



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

EMERSON CLEISTER LIMA MUNIZ

COMPLEXIDADE DE NOVOS PRODUTOS: PROPOSTA DE
UM MODELO DINÂMICO PARA ANÁLISE DA PERDA DE
PRODUTIVIDADE EM SISTEMAS FLOW SHOP

FLORIANÓPOLIS, SC
2015

Emerson Cleister Lima Muniz

**COMPLEXIDADE DE NOVOS PRODUTOS: PROPOSTA DE
UM MODELO DINÂMICO PARA ANÁLISE DA PERDA DE
PRODUTIVIDADE EM SISTEMAS FLOW SHOP**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação em Engenharia de
Produção da Universidade Federal de
Santa Catarina, para obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Osmar Possamai, Dr.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Muniz, Emerson Cleister Lima

Complexidade de Novos Produtos: Proposta de um Modelo Dinâmico para
Análise da Perda de Produtividade em Sistemas Flow Shop / Emerson Cleister
Lima Muniz ; orientador, Osmar Possamai – Florianópolis, SC, 2015

137 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Inclui referência

1. Engenharia de Produção. 2. Complexidade de produtos. 3. Produtividade.
4. Dinâmica de Sistemas. I. Possamai, Osmar. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Emerson Cleister Lima Muniz

**COMPLEXIDADE DE NOVOS PRODUTOS: PROPOSTA DE
UM MODELO DINÂMICO PARA ANÁLISE DA PERDA DE
PRODUTIVIDADE EM SISTEMAS FLOW SHOP**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, __ de _____ de 2015.

Prof. Fernando Antonio Forcellini, Dr.

Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Osmar Possamai, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Felipe de Abreu, PhD.

Membro

Universidade Federal de Sergipe

Prof. Glauco Garcia Martins Pereira da Silva, Dr.

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maurício Uriona Maldonado, Dr.

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho integralmente a minha mãe, Maria da Glória, minha maior fonte de força, bondade e dedicação a vida. Por você eu jamais desistirei de lutar.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades e ensinamentos que coloca diante de minha vida, os quais contribuem de modo direto para minha evolução espiritual neste plano;

À minha mãe, Maria da Glória, meu maior exemplo de vida, sem seu apoio, amor e educação eu jamais teria me tornado o homem de caráter, ética e princípios que sou; Aos meus demais familiares, incluindo tias, tios, primos e primas, obrigado por todo o apoio e carinho sempre; Em especial ao meu irmão de alma Gean Anderson, que mesmo longe sempre me deu o apoio necessário;

À minha Tia Maria José, por jamais desistir de mim, por sempre acreditar em mim e me mostrar que o caminho é árduo, porém com batalha ele sempre pode ser alcançado; Sem mencionar todo o seu amor de mãe cedido ao longo de toda a minha vida;

Aos meus dois grandes amigos, Aline e Pedro, meus pais adotivos, por todos os momentos bons, palavras de apoio, carinho, amor, afeto, atenção e conselhos. Se hoje sou o profissional que sou, parte disto é derivado de tudo que me ensinam diariamente;

Ao meu orientador, Osmar Possamai por todos os ensinamentos e conselhos compartilhados ao longo destes anos, graças ao senhor alcanço hoje parte dos meus sonhos profissionais;

Aos professores Glauco e Maurício, obrigado por todas as contribuições que deram ao meu trabalho, em especial ao Prof. Maurício por toda sua gentileza e educação em sempre me receber em sua sala para sanar dúvidas;

Aos amigos que fiz graças ao Mestrado, e que muito me apoiaram ao longo desta árdua e difícil jornada: Meri, Patrícia, Adriano, Anny, George, Vezigel, Rafael; Em especial ao Nicholas, Elizangela, Inácia e Daniel, vocês são peças fundamentais em minha vida, e um dos melhores presentes que Florianópolis poderia me dar, amo-os incondicionalmente;

Aos meus grandes amigos que ficaram em Sergipe e que muito me apoiaram ao longo desta jornada, em especial a Mayana, Anderson, Claudinha, Marco, Tia Renilde, dentre outros;

Um agradecimento mais que especial à Ronielly, saiba que sem o seu apoio incondicional, às suas ligações diárias enquanto distantes, suas palavras de conforto, e principalmente o amor que me concede e emana de seu coração, foram pontos extremamente importantes para que hoje eu alcançasse mais este objetivo na vida, Te amo incondicionalmente minha amiga;

Ao meu amigo Alisson, por todo o apoio e palavras de conforto sempre, obrigado por sempre acreditar em mim e me mostrar que eu era capaz sempre, parte desta conquista eu devo a você, e saiba que o tenho como exemplo de profissional;

Ao Léon, por sempre me mostrar o lado humano e feliz que a vida tem, sua amizade é e sempre será vital em minha vida.

Ao Marcel, por me ensinar as coisas mais puras e verdadeiras da vida, obrigado por tudo, saiba que mesmo longe você esteve sempre presente em meu coração e nos momentos mais importantes deste ciclo que se finaliza;

Por fim, um agradecimento especial aos alunos da Turma de Engenharia de Produção/2011 da UFS, hoje meus alunos tão especiais e que amo, obrigado por toda a força, atenção e carinho que sempre me deram ao longo deste período de mestrando.

“Ando devagar por que já tive
pressa, e levo este sorriso por que
já chorei demais. Hoje me sinto
mais forte, mais feliz quem sabe.
Só levo a certeza de que muito
pouco eu sei, Nada sei”. (Renato
Teixeira e Almir Sater)

RESUMO

A globalização vem mudando constantemente as características do mercado consumidor no qual as empresas estão inseridas, bem como as necessidades de seus clientes. Deste modo, para se manterem competitivas dentro deste mercado, as empresas precisam atualizar constantemente suas tecnologias empregadas, visando sempre a entrega de produtos inovadores para seus clientes. Para a criação destas inovações, as empresas necessitam inserir em seus produtos, determinadas características que acabam culminando com o aumento da complexidade destes. Complexidades estas, que podem gerar efeitos não desejados no desempenho dos sistemas produtivos, como na produtividade. Portanto, conhecer bem os efeitos que a complexidade pode causar dentro da manufatura pode ser considerado um dos grandes desafios que as empresas modernas precisam aprender a lidar. Desta forma, o trabalho se propõe a desenvolver um modelo de simulação que possibilite verificar os efeitos que a complexidade de produtos pode causar na produtividade de um sistema produtivo. Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o termo complexidade e mais detalhadamente sobre a complexidade de produtos e os elementos que a caracterizam. Como resultado da pesquisa, foram identificados os elementos que caracterizam a complexidade de produtos, bem como os possíveis efeitos que estes elementos podem causar dentro da manufatura. Na sequência, foi desenvolvido um modelo de simulação dinâmico para representação de um sistema de produção do tipo Flow Shop que permitiu verificar que os incrementos na complexidade dos produtos geram quedas entre 50 a 65% na produtividade total do sistema. Por fim, observou-se também que para o sistema modelado, a análise das alterações que a complexidade pode gerar em linha é uma ferramenta eficaz para ganhos produtivos, demonstrando assim que uma gestão eficiente da complexidade se faz necessária nos processos de desenvolvimento de produtos.

Palavras-chave: Complexidade de produtos; Produtividade; Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

Globalization has been constantly changing the features of the consumer market in which enterprises are inserted, as well as their clients' necessities. Therefore, in order to maintain a competitive nature in that market, enterprises need to constantly update employed technology, always aiming to deliver innovative products to their clients. To create such innovations, enterprises must apply certain features to their products, which leads to the increase of the products' complexity. These complexities may generate undesirable effects within the productive systems as well as within the productivity itself. Thus, knowing the effects the product complexity can cause in the manufacturing process may be considered one of the great challenges with which modern enterprises need to learn how to deal. Thereby, this work proposes to develop a simulation model that enables to verify the effects the product complexity can cause in the productivity of a productive system. First a bibliographic research was held on the term "complexity" and more minutely on product complexity and the elements that characterize them. As a result of this research, identification of the elements that characterize product complexity was acquired, as well as possible effects these elements might cause in the manufacturing process. Afterwards, the work developed a dynamic simulation model for the representation of a Flow Shop production system that allowed to verify that the products' complexities generate decreases varying from 50 to 65% in the overall productivity of the system. Finally, it was also noted that, for the modeled system, the analysis of the changes that the complexity can generate is an effective tool for productive earnings, therefore showing that an effective management of the product complexity is much necessary in the product development processes.

Keywords: Complexity; Product complexity; Productivity; Dynamic Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da pesquisa	33
Figura 2 - Dimensões da Complexidade na manufatura.....	40
Figura 3 - Elementos que caracterizam a complexidade de produtos ...	43
Figura 4 - As complexidades no sistema produtivo	45
Figura 5 - A complexidade de produtos e suas influências dentro da manufatura.....	46
Figura 6 - Inserção da complexidade de produtos na simulação	53
Figura 7 - Relação Causal entre elementos de um sistema.....	56
Figura 8 - Diagrama de Laço Causal.....	57
Figura 9 - Laço Causal entre duas variáveis.....	58
Figura 10 - Diagrama de Estoques e Fluxos.....	59
Figura 11 - Modelo Genérico para um Sistema de Produção.....	63
Figura 12 - Segmentação do Modelo Genérico.....	65
Figura 13 - Mapa Causal do Bloco 01.....	66
Figura 14 - Mapa Causal do Bloco 02.....	68
Figura 15 - Segunda parte do Mapa Causal do bloco 02.....	69
Figura 16 - Mapa causal do bloco 03	73
Figura 17 - Modelo proposto.....	78
Figura 18 - Efeitos da Complexidade de Produtos no Sistema Produtivo	79
Figura 19 - Diagrama de fluxo e estoque para a Previsão da Demanda do primeiro produto.....	82
Figura 20 - Diagrama de fluxo e estoque para a Previsão da Demanda do segundo produto	82
Figura 21 - Fluxo de material do modelo proposto	84
Figura 22 - Representação gráfica da primeira célula de produção do modelo proposto	85
Figura 23 - Representação gráfica da segunda célula de produção do modelo proposto	85
Figura 24 - Representação de todo o fluxo material do modelo proposto	86
Figura 25 - Células de produção do segundo bloco do modelo proposto	88
Figura 26 – Estoque Final do Produto 10% mais complexo	98
Figura 27- Resultado de Verificação 01.....	100
Figura 28 - Resultado de Verificação 02.....	101
Figura 29 – Resultado de Verificação 03	102
Figura 30 - Resultado de Verificação 04.....	103
Figura 31- Teste de Condições Extremas.....	104

Figura 32 - Comportamento da produtividade com alterações análogas nos tempos padrões das células.....	110
Figura 33 - Comportamento da Produtividade com incrementos diversos de 10% na complexidade	112
Figura 34 - Comportamento da Produtividade com incrementos distintos de complexidade	114
Figura 35 - Comparação na produtividade do processo.....	115
Figura 36 - Comportamento da Produtividade com incrementos únicos em uma célula	118
Figura 37 – Comportamentos obtidos com todas as variações na complexidade do produto.....	119
Figura 38 - Comportamento da Produtividade, sendo a primeira célula gargalo.	122
Figura 39 – Produtividade com incrementos de complexidade sentidos nos dois tipos de células.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estrutura do Produto Base.....	94
Tabela 2 - Estrutura do Produto 10% mais complexo	96
Tabela 3 - Composição da complexidade para alterações similares na linha de produção	109
Tabela 4 - Composição da complexidade para alterações distintas na linha de produção	113
Tabela 5 - Composição da complexidade para alterações em apenas uma das células na linha de produção	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Atributos da complexidade de produtos	42
Quadro 2 - Efeitos da complexidade de produtos na manufatura	52
Quadro 3- Descrição das Variáveis do Modelo	80
Quadro 4 - Composição da Complexidade do Produto	92

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO	26
1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	27
1.3. ESCOPO DO TRABALHO	30
1.4. METODOLOGIA EMPREGADA NA PESQUISA	31
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	34
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
2.1. A COMPLEXIDADE.....	35
2.2. A COMPLEXIDADE NOS SISTEMAS.....	37
2.3. A COMPLEXIDADE NA MANUFATURA	39
2.4. A COMPLEXIDADE DE PRODUTOS	40
2.5. OS EFEITOS DA COMPLEXIDADE DE PRODUTOS NA PRODUTIVIDADE	45
2.6. DINÂMICA DE SISTEMAS E SEUS ELEMENTOS	55
2.6.1. Relação Causal	55
2.6.2. Diagrama Causal.....	56
2.6.3. Estoques e fluxos	58
2.6.4. Atrasos.....	59
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
3. MODELO PROPOSTO	63
3.1. CONDUÇÃO DA MODELAGEM.....	63
3.2. MODELAGEM CONCEITUAL.....	64
3.2.1. Segmentação do Bloco 01	65
3.2.2. Segmentação do Bloco 02	67
3.2.3. Segmentação do Bloco 03	72
3.3. MODELAGEM ESTRUTURAL	75

3.3.1. Diagramas de Fluxos e Estoques do modelo proposto.....	82
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
4. VERIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	91
4.1. A COMPLEXIDADE DE PRODUTOS E SEUS INCREMENTOS NO MODELO.....	91
4.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO	99
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5. EFEITOS DA COMPLEXIDADE NA PRODUTIVIDADE....	107
5.1. PRIMEIRO GRUPO DE ANÁLISE.....	107
5.2. SEGUNDO GRUPO DE ANÁLISE	120
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
6. CONCLUSÃO	127
6.1. CONCLUSÕES	127
6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	129
REFERÊNCIAS.....	131

1. INTRODUÇÃO

A globalização e o avanço tecnológico vêm tornando mais desafiador o cenário atual de mercado em que as organizações estão inseridas. Em conjunto com estes fatores, tem-se também a elevação do nível de exigência dos clientes, proporcionado pela maior quantidade de informação disponibilizada, assim como um maior número de possibilidades de produtos ofertados (GOTTTFREDSON; ASPINALL, 2005; WANG, 2010). Atrelado a isto, nota-se também uma tendência na redução da duração do ciclo de vida dos produtos, ocasionado pela obsolescência mercadológica e tecnológica destes (JACOBS; SWINK, 2011; OTTOSSON, 2004; ELMARAGHY; URBANIC, 2004).

Estas tendências têm obrigado as organizações a desenvolver produtos diferenciados e introduzi-los no mercado da forma mais rápida possível, com qualidade, fácil manufaturabilidade e a um baixo custo (WANG, 2010; WANG *et al.*, 2011; MIRAGLIOTTA; PERONA, 2004). Deste modo, atualmente, o ato de desenvolver produtos, e promover o lançamento com maior velocidade, é um dos grandes ganhos competitivos das empresas, e está diretamente ligado aos anseios e necessidades dos consumidores.

No cenário passado, especialmente antes dos anos 90, o processo de desenvolvimento de produtos não era encarado de modo tão dinâmico como é hoje, haja vista que os produtos desenvolvidos eram lançados no mercado sem tanta pressa como é exigido atualmente. Da mesma forma, se alguns desejos dos compradores não podiam ser atendidos inicialmente, com o decorrer de seu ciclo de vida, os produtos iam passando por ajustes e melhorias até que fosse atingida sua melhor forma, pois o produto era desenvolvido para manter o seu conceito original por um longo período de tempo (GELAIN, 2010).

Entretanto, na década atual, é normal que quando um novo produto é lançado no mercado, já está ocorrendo, simultaneamente, o desenvolvimento de seu sucessor. Isto se dá pela necessidade, visível principalmente nos últimos anos, das empresas terem que oferecer níveis crescentes de variedade de produtos e novidades para o mercado. Contudo, devido ao curto ciclo de vida dos produtos, os lucros proporcionados por estes produtos têm se tornado mais limitados a cada dia. Isto pode ser explicado, pois os custos inerentes ao desenvolvimento e a oferta de produtos vêm aumentando, principalmente pela crescente complexidade advinda dos novos produtos em desenvolvimento (BRADOUS, 2011; JACOBS; SWINK, 2011; OTTOSSON, 2004).

Nesse contexto, a complexidade de produtos é atualmente um dos principais desafios que a gestão da manufatura tem de lidar, sobretudo no que se refere ao desempenho e eficiência fabril. Assim, a capacidade de gerenciamento tornou-se essencial para geração de ganhos competitivos, já que as inovações tecnológicas, necessidades dos clientes e exigência em qualidade dos produtos, são fatores que só tendem a aumentar ao longo do tempo, contribuindo assim para o aumento da complexidade dos novos produtos (SCHLEICH; SCHAFFER, 2007; BRADOUS, 2011; GOTTFREDSON; ASPINALL, 2005).

De acordo com Elmaraghy et al. (2012), as empresas que forem capazes de gerenciar com sucesso o seu desenvolvimento de produtos, lidando de modo eficaz com a complexidade destes, despontam na corrida por vantagem competitiva dentro do mercado consumidor. Deste modo, a complexidade pode ser vista como um problema dentro das organizações, dado que sua existência e má gestão são capazes de proporcionar o aumento dos custos e consequente perda produtiva no sistema de produção. Entretanto, para um melhor gerenciamento desta complexidade dentro dos sistemas e consequentemente um melhor desempenho fabril, primeiramente é necessário se conhecer quais os efeitos que a complexidade de produtos pode causar na manufatura e em sua produtividade. Diante disto, este trabalho busca responder a seguinte pergunta de pesquisa: quais os efeitos que o aumento na complexidade dos produtos pode causar na produtividade de um sistema produtivo.

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

O trabalho tem por objetivo propor um modelo de simulação dinâmico para verificar os efeitos que a complexidade de produtos pode causar na produtividade de sistemas Flow Shop ao longo do tempo. E para alcançar o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os elementos que influenciam e caracterizam a complexidade de produtos;
- Identificar as variáveis do sistema produtivo que podem sofrer algum impacto decorrente dos elementos da complexidade de produtos;
- Determinar as relações de causa e efeito entre os elementos da complexidade de produtos e as variáveis do sistema de produção a ser modelado;

- Desenvolver modelos conceituais para representação das relações entre os elementos da complexidade e as variáveis do sistema de produção;
- Desenvolver um modelo de simulação dinâmico para verificação dos efeitos da complexidade de produtos em um sistema Flow Shop.

1.2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Sempre que um novo produto é projetado, corre-se o risco de haver um aumento da complexidade do sistema, de tal modo que as ações realizadas no momento do projeto influenciarão decisões posteriores (AXELROD; COHEN, 2000).

Pode-se dizer que as mudanças que aumentam a variedade de produtos dentro do ambiente fabril, podem não representar, proporcionalmente maior lucro ou aumento de vendas, mas podem implicar diretamente na elevação da complexidade da produção. Esta elevação da complexidade de mix de produtos pode gerar impactos em diversos pontos da produção, necessitando assim de maiores recursos produtivos, o que implica em maiores custos, estoques ou mesmo problemas de distribuição (ELMARAGHY; SAMY, 2012; WANG et al., 2011; GOTTFREDSON; ASPINALL, 2005).

Em consonância, Schleich e Schaffer (2007), afirmam que na indústria automotiva, a complexidade é identificada como um dos fatores de custo mais importantes na produção, com uma representação de 64% dos custos totais. Já Gottfredson e Aspinall (2005), embasados em uma pesquisa com 900 empresários de todo o mundo, constataram que 70% deles admitem que a complexidade excessiva aumenta seus custos produtivos e impedem o aumento dos lucros. Atrelado a isto, Jacobs (2007) afirma que diversas empresas em todo o mundo estão buscando fortemente reduzir e controlar a complexidade de produto, apontando o setor de marketing e vendas como os possíveis responsáveis pelo incremento na complexidade dos produtos.

Outro dado interessante mostra que a busca incessante pela diferenciação de novos produtos, projetados e introduzidos no mercado, implica em uma relação de 1,7 novo produto desenvolvido para cada produto retirado do mercado. Assim, uma das principais fontes que impulsionam a complexidade com a qual as empresas têm de lidar, reside no aumento considerável de novos fornecedores, partes e componentes destes novos produtos (HOOLE, 2006).

Focadas no objetivo de atender a demanda por novos produtos, as empresas não conseguem vislumbrar todos os impactos que a inserção de complexidade de produtos pode causar em sua produção (GOTTFREDSON; ASPINALL, 2005). Deste modo, a complexidade resultante pode influenciar negativamente diversos pontos da produção, seja nos custos relacionados ao estoques e distribuição, seja por necessidade de setups e maiores estoques em processo, ou no aumento de volume de produtos acabados armazenados (ELMARAGHY; SAMY, 2012). A complexidade de produtos pode aumentar também a dificuldade de gerenciamento do plano mestre de produção, dado o aumento do número de produtos sendo processados, suas peças e componentes diversos (RAMDAS, 2003; WACKER, 2004).

Entretanto, em uma análise dos sistemas produtivos, cabe salientar que os efeitos apresentados no parágrafo anterior não são gerados unicamente pela complexidade de produtos e suas possíveis variações. Mas também, por um conjunto de outros fatores que não abarcam o escopo desta pesquisa e que são inerentes a qualquer sistema produtivo, como por exemplo, mudanças inesperadas na demanda por produtos, em decorrência de novos pedidos emergenciais por exemplo, podem implicar no aumento do número de ordens de produção. Deste modo, a quantidade de produtos a ser produzida pode ser elevada, contribuindo assim para a geração da necessidade de um maior número de componentes e partes dos produtos a serem produzidos, ou mesmo estarem disponíveis em estoque para uso imediato.

Outro fator que pode gerar os mesmos efeitos que a complexidade de produtos pode causar, reside na necessidade de um maior número de setups, provocado pelas variações nas ordens de produção, já que a linha necessitará ser adaptada para cada um dos tipos de produtos a ser produzido. Estas implicações, por sua vez, acabam afetando também o processo de estruturação do plano mestre de produção, pois os gerentes de planta devem levar em consideração a quantidade de paradas que a linha necessite fazer para garantir que a demanda solicitada seja totalmente produzida ao menor custo possível.

No entanto, quando se trata do estudo da complexidade e seus efeitos na manufatura, alguns autores (JACOBS, 2007; BRADOUS, 2011; RAMDAS, 2003) afirmam que existem diversos pontos, ainda desconhecidos, que contribuem para o aumento da complexidade dos produtos. Estes mesmos autores ainda afirmam que, um dos pontos que dificultam esta análise reside no fato da complexidade de produtos não possuir um conceito geral e amplamente aceito na literatura.

Deste modo, conhecer e compreender bem os elementos que influenciam a complexidade é um ponto chave para as empresas que projetam e lançam novos produtos no mercado. Logo, o gerenciamento da complexidade deve tornar-se o núcleo de capacidade superior e diferenciação das empresas que lidam com a mesma (SCHLEICH; SCHAFFER, 2007, BRADOUS, 2001; RAMDAS, 2003). Para Miragliotta e Perona (2004), o controle e gestão do nível crescente de complexidade devem ser considerados como uma questão estratégica para as empresas, o que reforça ainda mais a importância e necessidade de conhecer e detalhar a complexidade que permeia o ambiente produtivo.

Muito embora, as empresas e seus gestores saibam da existência da complexidade em seu ambiente fabril, comumente não conhecem detalhadamente nem a origem do problema nem os impactos que a complexidade pode gerar. E como resposta típica para o controle desta complexidade, visando sempre a redução da mesma, as empresas fazem uso amplo de ferramentas de projeto, como o emprego de plataformas e padrões para produção dos itens. Contudo, estas iniciativas podem ser capazes de reduzir a complexidade em áreas de fácil visualização, mas não conseguem atacar a complexidade como um todo, escondida em outros pontos dentro da cadeia de valor (GOTTTFREDSON; ASPINALL, 2005).

Ainda no contexto da busca por conhecimento e identificação dos efeitos da complexidade de produtos na manufatura, Elmaraghy et al. (2012) afirmam que o conhecimento desta complexidade pela empresa, pode ser usado como arma competitiva frente os concorrentes. Dado que, o conhecimento desta complexidade e seus efeitos, pode ser usado como uma barreira de proteção frente a reprodução dos produtos lançados no mercado, já que os concorrentes podem conhecer bem os produtos lançados e suas especificações, mas não a competência central de desenvolvimento dele, nem tão pouco os efeitos que estes produtos podem gerar nos processos produtivos.

Em se tratando da composição da complexidade de produtos, Jacobs (2007) e Bradous (2011), salientam que ela não deve ser limitada apenas pelo número de componentes que o produto possui. Em reforço a esta afirmação, Pasche (2008) salienta que a complexidade de produtos faz parte de um conjunto de complexidades, composta pela complexidade de programação, portfólio de clientes, produto e processos, sendo que esta última pode ainda ser dividida em complexidade de programação da produção, organização e sistema de produção.

No que diz respeito à existência de um conceito formal para a complexidade de produtos, alguns autores (RAMDAS, 2003; PASCHE, 2008; JACOBS, 2007; BRADOUS, 2011) afirmam que muitas pesquisas na literatura empregam o termo em seus trabalhos, mas não se identificou até hoje uma definição única e aceita por todos. Isto se dá pelo fato de que cada pesquisador busca empregar um conceito embasado na escolha de medidas de mensuração, disponibilidade de informações e nos objetivos de análise de sua pesquisa, implicando assim no desenvolvimento de conceitos específicos para cada estudo (DING et al., 2007; WU et al., 2007).

Portanto, é útil se ter uma maior compreensão do que representa a complexidade de produtos, tanto de modo qualitativo como quantitativo, e sobretudo, dos efeitos que ela pode causar nos sistemas produtivos. Em especial, se busca identificar as variáveis que a complexidade afeta, assim como identificar pontos de melhoria em seu gerenciamento e gestão. De acordo com Kinnunen (2006), a complexidade de produtos aumenta significativamente após a fase de projeto. Deste modo, o conhecimento e redução desta complexidade durante o desenvolvimento do produto é uma atividade importante para todo o sistema produtivo da organização. E em consonância, Suh (2003) afirma que a preocupação com o projeto dos produtos e os sistemas de produção, buscando reduzir sempre a complexidade para obter ganhos de produtividade e confiabilidade, é um dos fatores de decisão mais importantes na competitividade industrial.

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho busca a verificação dos efeitos que o aumento na complexidade dos produtos pode causar na produtividade da produção em um período de tempo. Portanto, não se buscará identificar as variáveis externas ao ambiente fabril que sejam capazes de gerar algum tipo de variação ou aumento na demanda dos produtos, ou mesmo, na complexidade dos produtos.

No que diz respeito à complexidade de produtos e os elementos que a caracterizam e a influenciam, entende-se que possíveis variações nesta complexidade se dão através de mudanças que possam ocorrer no número de componentes, na inserção de componentes com geometria diferente, na inserção de componentes com matéria-prima distintas e nas interações entre os componentes de um produto. Quaisquer outras características que sejam capazes de gerar variações na complexidade dos produtos não foram consideradas neste trabalho.

Para fins de simulação e construção do modelo proposto, cabe salientar que as variações na complexidade dos produtos, ocasionadas por mudanças em um ou mais dos quatro elementos que a influenciam, provocam alterações nos tempos de processamento das células de produção do modelo proposto, não alterando assim o seu fluxo de processamento. O que por sua vez, justifica o fato do modelo proposto representar um sistema de produção Flow Shop, onde todas as tarefas têm a mesma sequência de processamento no conjunto de células pertencentes à linha de produção modelada.

Para a verificação dos efeitos da complexidade de produtos na produtividade dos sistemas, cabe salientar que ela será realizada, tendo como base o indicador de produtividade apresentado no capítulo dois deste trabalho. O qual, considera como recurso de entrada o tempo total necessário para a produção completa de toda a demanda solicitada para o produto que possui uma complexidade base pré-determinada para fins de simulação apenas. E como saída do indicador, a quantidade de produtos que o sistema foi capaz de produzir no mesmo intervalo de tempo em que toda a produção do produto denominado base foi realizada.

Cabe notar que o emprego de outras variáveis para a análise dos efeitos que a complexidade de produtos pode gerar nos sistemas produtivos não serão considerados nesta pesquisa. Entretanto, como forma de enriquecimento deste trabalho e uma melhor estruturação do modelo proposto, variáveis relacionadas com a capacidade produtiva de uma linha de produção, bem como níveis de estoques de segurança são analisados.

1.4. METODOLOGIA EMPREGADA NA PESQUISA

A pesquisa em questão faz uso do método indutivo, amparado por pesquisa exploratória do tema, almejando o alcance dos objetivos específicos que, por sua vez, permitirão a identificação dos efeitos provenientes da complexidade de produto na produtividade. Esta escolha recai devido ao fato do problema de pesquisa ora em destaque, caracterizar-se pelos ciclos contínuos de observação acerca dos fatos que ocorrem em ambientes de manufatura.

Esta forma de proceder gera um entendimento maior sobre as relações entre estes fatos, o que permite a construção de predições do mundo real através deste entendimento e verificando estas predições por meio de mais observações e simulações (FUTAMI, 2012). De acordo com Gil (2010), o método de indução, por intermédio de dados

particulares, permite o desenvolvimento de um processo mental culminando com a inferência de uma verdade geral ou universal, não contida nas partes examinadas.

Para tornar mais explícito o problema de estudo, uma pesquisa bibliográfica foi realizada, de modo que estas investigações na literatura permitissem uma maior familiaridade com o problema de pesquisa, melhorando sua precisão. Estas investigações, embasadas em publicações científicas da área correlata ao tema, enfatizam ainda mais a caracterização desta pesquisa como exploratória, em sua fase inicial (LAKATOS; MARCONI, 2007). Inúmeras são as formas para classificação de uma pesquisa, e no caso desta, em se tratando de sua natureza, ela pode ser considerada uma pesquisa aplicada, pois de acordo com Menezes e Silva (2005), este tipo de pesquisa possui o objetivo de gerar conhecimento para a aplicação prática dirigidas à solução de problemas específicos.

Ainda com relação aos métodos adotados para desenvolvimento da pesquisa, salienta-se o emprego da modelagem e simulação, pois de acordo com Turrión e Mello (2012), estes métodos permitem a representação de um sistema em estudo, contribuindo assim para o estudo e análise mais detalhados das relações existentes entre os diversos elementos pertencentes ao sistema em modelagem e estudo. Deste modo, pode-se então conhecer mais a fundo o funcionamento do sistema, bem como desenvolver e testar novas políticas operacionais, juntamente com a aplicação de novos conceitos ao sistema, permitindo assim uma análise mais detalhada dos efeitos que possíveis alterações possam gerar no sistema em estudo, antes mesmo de sua real aplicação nos sistemas reais, como uma linha de produção, por exemplo.

Em se tratando da abordagem empregada, ela pode ser caracterizada parcialmente quantitativa, fato este comumente utilizado dentro de pesquisas na área das ciências exatas, como a engenharia. Entretanto, ela também apresenta características qualitativas, ao se basear na interpretação subjetiva dos fatos, não sendo interpretada apenas por números, mas também por ferramentas lógicas e de observação.

Os resultados desta pesquisa também poderão ser expressos verbalmente, com o intuito de se criar a compreensão necessária de relacionamentos ou interações complexas existentes ao longo do desenvolvimento do trabalho (MENEZES; SILVA, 2005; SILVA, 2010; MINAYO et al., 2000). Esse tipo de abordagem é dependente da experiência do pesquisador para a interpretação, principalmente, dos dados subjetivos, mas ajuda bastante na análise dos mesmos, pois nos

casos onde se pretende analisar e expor a realidade, não se pode restringir apenas a um referencial quantitativo (MINAYO et al., 2000). Deste modo, o emprego da combinação das abordagens quantitativo e qualitativo será de grande utilidade na análise dos dados gerados, e na sua conversão em informações que contribuam para a solução do problema.

Para o desenvolvimento e estruturação deste trabalho, os passos de pesquisa apresentados na Figura 1 foram adotados.

Figura 1 - Desenvolvimento da pesquisa



FONTE: O autor

Onde primeiramente buscou-se definir o problema de pesquisa, bem como os objetivos que a norteariam. De posse destes, deu-se início a todo o levantamento bibliográfico necessário, tendo como fonte de informação as bases de dados nacionais e internacionais. Com a pesquisa bibliográfica, as etapas referentes ao estudo e compreensão da complexidade e da complexidade de produtos foram realizadas. Através destes estudos, os modelos conceituais e a modelagem estrutural do modelo proposto foram desenvolvidas, permitindo assim a visualização das relações de causa e efeito entre a complexidade de produtos e as variáveis do sistema em estudo.

Na modelagem estrutural e desenvolvimento das simulações, os preceitos da Dinâmica de Sistemas foram aplicados, culminando assim com a estruturação dos diversos diagramas de fluxos e estoques pertencentes ao modelo proposto desenvolvido. A nível de interface

gráfica computacional, salienta-se que o software Vensim® PLE (Versão 6.3) da Ventana System Inc foi empregado, permitindo assim a criação dos diagramas já mencionados, bem como a realização de todo o processo de simulação. Em sequência, procedeu-se a análise dos resultados obtidos e obtenção das conclusões de pesquisa.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos. O segundo capítulo apresenta os conceitos relacionados à complexidade, complexidade de produtos e os efeitos que ela pode causar nos sistemas produtivos, bem como uma explanação dos principais preceitos e métodos adotados pela Dinâmica de Sistemas. O terceiro capítulo apresenta as etapas e métodos que culminaram com o desenvolvimento do modelo proposto. O quarto capítulo apresenta o modo como a complexidade dos produtos foi analisada e inserida no modelo proposto, juntamente com a apresentação dos testes de verificação do modelo. O quinto capítulo apresenta os principais resultados obtidos através da realização de um conjunto exaustivo de simulações com o modelo proposto, que permitiram a verificação dos efeitos que a complexidade pode gerar na produtividade dos sistemas. Por fim, no capítulo seis são expostas as conclusões do trabalho e as sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo discute-se o termo complexidade em uma visão macro, sem restrições de campos de pesquisa ou utilização. Busca-se expor os principais conceitos e elementos que influenciam a complexidade, assim como suas ramificações para definições de conceitos mais específicos de complexidade, como a própria complexidade de produtos, e seus efeitos dentro da produção industrial.

2.1. A COMPLEXIDADE

A complexidade vem sendo discutida na física, biologia, filosofia, engenharia, gestão, saúde, sociologia, dentre outros (BOZARTH *et al.*, 2009; SUH, 2003, 2005). Originária da palavra latina “*Complexus*”, que significa “aquilo que é tecido junto” ou “entrelaçado”, a complexidade pode ser interpretada de vários modos. Pode-se considerar, por exemplo, um objeto complexo, como sendo aquele composto por mais de um elemento ou peça, unidas de tal modo que seja quase impossível uma análise destas em separado (MORIN, 2005, 2010; WANG, 2010).

Em convergência, Bradous (2011) afirma compreender a complexidade como um conjunto de elementos diferentes, porém relacionados, ou mesmo algo difícil de ser compreendido, devido suas diversas partes distintas e interligadas. Já Giovannini (2002) diz que a complexidade pode ser entendida como algo que abrange muitos elementos ou partes, bem como um conjunto ou grupo de coisas que têm qualquer ligação ou nexos entre si.

Observa-se que a variedade de interpretações com relação ao significado da complexidade, dificulta uma uniformidade de conceito, e é gerada pelo fato de que cada pesquisa busca compreender a complexidade sob seu escopo de trabalho. No entanto, existem muitas tentativas para criação de uma definição universalmente aceita do termo complexidade. Entretanto, esta definição única, geral e aceita universalmente ainda está em construção, pois as mesmas são tão diversas quanto os autores que a desenvolveram, tais como (BLECKER *et al.*, 2004; JACOBS, 2007; RAMDAS, 2003; SCHLEICH; SCHAFFER, 2007; WU *et al.*, 2007; LEE, 2003, SUH, 2003; RODRÍGUEZ-TORO *et al.* 2003).

Em adição, Lee (2003) e Suh (2003) afirmam que "o que é complexidade" ainda permanece vago até que um alvo da pergunta seja especificado, visto que uma métrica que funciona muito bem para um

determinado campo de estudo pode não ser adequado aos demais. Denota-se aqui então uma pluralidade ótica advinda da visão e objetivo de cada pesquisador. De acordo com Morin (2010) e em consonância com Lee (2003) e Rodríguez-Toro *et al.* (2003), não se pode chegar à complexidade através de uma definição prévia. É necessário seguir caminhos tão diversos, de tal modo que leve o pesquisador a se perguntar se existem “complexidades” e não somente uma “complexidade”.

De acordo com Iarozinski (2001), a complexidade está nos limites do conhecimento, e, portanto, toda tentativa de oferecer uma definição a ela será restrita e incompleta. Enfatiza-se assim, que o melhor caminho para este trabalho é a busca pela compreensão de sua existência e não sua definição precisa e exata.

Na busca da compreensão da complexidade, Axelrod e Cohen (2000), afirmam que ela não trata apenas das muitas partes que envolvem o sistema, mas também das interações existentes entre elas. Já Mariotti (2007), em consonância com Giovannini (2002), salienta que a complexidade corresponde à multiplicidade, entrelaçamento e contínua interação de partes pertencentes a um sistema, ou mesmo, a interação entre uma infinidade de sistemas que compõem o mundo como um todo.

Em uma expansão de conceitos, a complexidade está dentro de cada ser humano, que por sua vez, são elementos da complexidade do mundo como um todo (MARIOTTI, 2007; MIRAGLIOTTA; PERONA, 2004). Já Leite *et al.* (2004), enfatizam as afirmações dos autores ora citados, ao mencionar que a complexidade de algo, é frequentemente relacionada a seu número de elementos, seus relacionamentos e os diversos fatores associados a cada um dos observadores. Deste modo, para algo ser complexo, necessitaria apenas ser composto por duas ou mais partes diferentes com conexões entre as mesmas, a qual dificulte sua compreensão e análise.

Para Bradous (2011), a complexidade é advinda de dois aspectos, intitulados pelo mesmo de “*Distiction* e *Connection*”. A distinção está voltada para a variedade ou heterogeneidade das partes e/ou elementos que compõem o objeto complexo. Enquanto que a conexão, diz respeito às ligações existentes entre as partes, ou seja, suas interações, que por sua vez, expressam a dependência que os elementos possuem uns com os outros, concluindo então que o aumento de um dos aspectos apresentados implicará em uma elevação no nível de complexidade.

Um ponto que merece discussão acerca da complexidade e suas inúmeras descrições reside no fato de diferenciá-la do termo

complicado, e não considerando estes dois termos como palavras sinônimas. Esta afirmativa pode ser justificada com base nas discussões apresentadas por Suh (2003), Perona e Marigliotta (2004) e Lee (2003), que convergem em seus pensamentos ao caracterizarem o complicado (sistema complicado) como um conjunto de partes ou elementos entrelaçados que podem ser analisadas separadamente, visando a obtenção de uma solução pertinente para o mesmo.

Entretanto, a complexidade vai muito além de um conjunto de partes ou elementos entrelaçados que podem ser analisados separadamente. Ela, com base nas afirmações já apresentadas por Morin (2005; 2010) e Wang (2010), pode ser compreendida como um sistema composto por diversos elementos entrelaçados de tal modo, que uma análise em separado destes elementos seja praticamente impossível.

2.2. A COMPLEXIDADE NOS SISTEMAS

Diversos são os elementos que podem contribuir para a complexidade em sistemas, gerando assim, sistemas complexos, sob uma análise da quantidade de elementos que estão envolvidos, ou mesmo, através das relações existentes entre estes elementos (SUH, 2005; LEITE *et al.*, 2004). Deste modo, torna-se pertinente salientar que, para este trabalho, o conceito de sistema complexo é o exposto por Coelho (2001), que afirma que sistemas complexos são sistemas com múltiplos elementos em interação, cujo comportamento pode ser interferido a partir do comportamento das partes. Em sintonia, Bozarth *et al.* (2009) afirmam que um sistema complexo é um conjunto de milhares de elementos que interagem entre si.

A justificativa para seleção do conceito de sistemas complexos exposto no parágrafo anterior por Coelho (2001), se dá pelo fato deste convergir com as ideias principais acerca da complexidade deste trabalho, relacionados com os elementos e as interações existentes entre eles, através de suas variedades e respectivas quantidades.

Dado que a variedade pode ser vista através dos diferentes elementos que podem existir em um sistema, assim como tipos distintos de interações, sejam eles físicos, mecânicos, dentre outros. Deste modo, Tarride (1998) apresenta o seguinte conceito de sistemas complexos:

“Sistemas com muitos componentes podem ser considerados complexos se comparados aos que têm poucos. A cardinalidade de um conjunto, então, pode ser considerada medida de

complexidade. Sistemas caracterizados por muita interdependência de componentes são considerados, geralmente, mais complexos do que os com pouca ou nenhuma. Sistemas “inenarráveis” (não-demonstráveis ou não calculáveis formalmente) podem ser considerados complexos, se comparados aos deterministas. A complexidade dos sistemas pode ser medida pelo conteúdo da informação. Por esse critério, os sistemas com muitos componentes idênticos são menos complexo dos do que os de tamanho comparável, onde os componentes são muito diferentes”.

Desta discussão, nota-se que a complexidade de sistemas pode ser analisada sob uma ótica distinta, se adotado apenas a quantidade de elementos de um produto. Entretanto, ao se tratar de quantidade de componentes de um produto, deve-se mencionar também a variedade que estes podem apresentar. Em consonância, Coelho (2001), afirma que sistemas com poucos elementos, podem apresentar um grande número de interações entre eles, o que por sua vez, acaba caracterizando assim um sistema complexo, mas não unicamente por uma análise embasada apenas na quantidade de seus elementos.

Para Jacobs (2007), a quantidade de elementos, com foco em um ambiente fabril, pode ser representada pelo grande volume de produtos que uma empresa possui em seu espaço interno para atendimento da demanda de mercado, ou insumos necessários para a produção. Já com relação à variedade destes elementos, Ramdas (2003), Blecker *et al.* (2004) e Lee (2003) argumentam que em nível organizacional, a variedade dos elementos pode ser vista através do portfólio de produtos da empresa, ao passo que, quanto mais produtos distintos a organização possui, maior será a sua complexidade. Contra argumentando ainda que, quanto maior for a quantidade de produtos distintos neste ambiente, maior será a variedade de componentes necessários para fabricação de cada um dos produtos, gerando assim, sistemas mais complexos.

No que diz respeito às interações dos elementos que pertencem ao sistema, Leite *et al.* (2013) e Schulz (2008) afirmam que elas existem em diversas esferas de análise, a partir do momento que se considera algo em estudo como sistema, tudo em seu interior ou ao seu redor (além de fronteiras, logo ambiente que o cerca), estão interagindo.

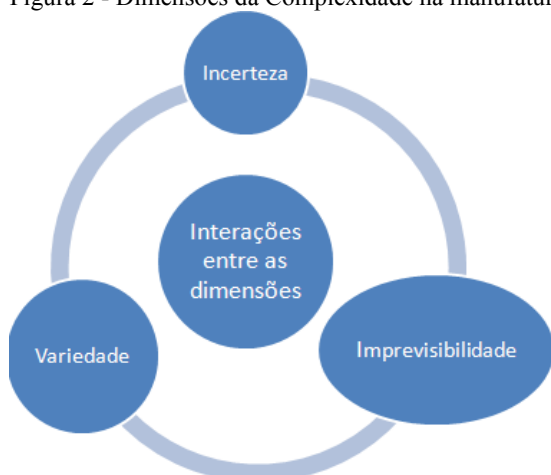
Em uma analogia com o ser humano, nota-se que o mesmo cria interações em todas as fases de sua vida, como na família, escola, vida pessoal e profissional. Logo, a existência de diversas interações faz com que o sistema, retroaja com seu ambiente, ao passo que o influencia e é influenciado por ele. Uma análise em nível organizacional demonstra também a presença de interações, como por exemplo, entre departamentos ou setores distintos como o de marketing, produção, financeiro e compras. Em contrapartida, o ambiente externo, na figura de clientes, fornecedores e o próprio governo, possuem ligações com as empresas e seus respectivos departamentos (AXELROD; COHEN, 2000; LEITE *et al.*, 2013).

Em se tratando de tipos e variedades das interações que podem existir entre elementos de um sistema, Iarozinski (2001) as caracteriza como físicas e informacionais. Na qual, a primeira, trata de conexões físicas que podem ocorrer entre elementos, como o encaixe e o posicionamento de duas ou mais peças de um produto, ou mesmo os equipamentos em um *layout* industrial. Já para as interações informacionais, Iarozinski (2001) e Axelrod e Cohen (2000) as expõem como as conexões que ocorrem entre elementos, como por exemplo, máquinas, pessoas, peças, dentre outros.

2.3. A COMPLEXIDADE NA MANUFATURA

Apesar da falta de uma definição formal do termo complexidade, pesquisadores aceitam e concordam que os sistemas de produção modernos estão se tornando mais e mais complexos (ELMARAGHY *et al.*, 2005; LEE, 2003; SUH, 2005). Dentre os fatores que justificam a maior complexidade, tem-se o aumento da concorrência, a maior exigência dos clientes, a globalização, a diversidade de tecnologias, novos produtos, novos conhecimentos, dentre outros (BRADOUS, 2011; ELMARAGHY; URBANIC, 2004; IAROZINSKI, 2001). Através de uma visão mais ampla acerca do aumento da complexidade na manufatura, Iarozinski (2001) afirma que ela pode ser proveniente de três dimensões distintas e inter-relacionadas, a variedade, a imprevisibilidade e a incerteza que permeiam o sistema produtivo, conforme é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Dimensões da Complexidade na manufatura



Fonte: Adaptado de Iarozinski (2001)

A variedade é gerada através dos inúmeros elementos que podem compor o sistema de manufatura, como insumos, produtos, processos, máquinas, pessoas, dentre outros. A imprevisibilidade se volta para as variações de comportamento que o sistema pode apresentar decorrentes das interações que possam existir entre os elementos dele, pois, alterações em um elemento ou um conjunto deles, podem gerar um novo comportamento dentro do sistema. Como por exemplo, alterações de demanda de mercado ou mesmo quebras inesperadas de máquinas podem alterar a quantidade de produtos a ser produzida pelo sistema.

Deste modo, a imprevisibilidade do sistema contribui para a incerteza dele, ao passo que a incerteza está relacionada com a capacidade de conhecimento e análise do sistema, bem como a quantidade e a qualidade das informações que podem ser extraídas dele (JACOBS, 2007; RAMDAS, 2003; BLECKER *et al.*, 2004; LEE, 2003; TONI; TONCHIA, 1998). Logo, quanto mais alterações os elementos apresentarem, maior será a incerteza e consequentemente a complexidade de um sistema de produção.

2.4. A COMPLEXIDADE DE PRODUTOS

Para seguir com a caracterização da complexidade adotada de Coelho (2001), a qual é função da quantidade e variedade, tanto dos elementos como das interações que um sistema pode possuir, além da

imprevisibilidade e incerteza que rondam o ambiente de manufatura (MORIN, 2010; JACOBS, 2007; PASCHE, 2008), necessita-se agora caracterizar a complexidade de produtos. O produto é o elo entre a empresa e seus clientes e é em torno do produto e da dinâmica desta relação que a manufatura pode sofrer as consequências resultantes da complexidade envolvida neste sistema de negócios. Diante disto, alguns conceitos, explicações e discussões acerca da complexidade de produtos podem ser obtidas na literatura, sendo que os mais relevantes para este trabalho serão apresentados a seguir.

Alguns autores (JACOBS, 2007; PASCHE, 2008; MACDUFFIE *et al.*, 1996; RAMDAS, 2003; GUPTA; KRISHNAN, 1999; CLOSS *et al.*, 2008; SUH, 2003; LEE, 2003; SCHULZ, 2008, KASKI; HEIKKILA, 2002; RODRÍGUEZ-TORO *et al.*, 2003; ZHU, *et al.*, 2008) compreendem a complexidade de produtos, sob a análise de quatro elementos que a caracterizam, o número de componentes, a variedade de componentes, o número de interações e a quantidade de interações entre os componentes. Em complemento, Jacobs (2007) elucida que este entendimento da complexidade de produtos pode também ser aplicada para análise da complexidade de outros sistemas, como por exemplo, um sistema de produção. Deste modo, adotam-se os diversos produtos como componentes do sistema e os diversos tipos de interações que podem existir entre eles.

Através de uma visão mais voltada para a estrutura em si do produto complementando o exposto no parágrafo anterior, os autores (BLISS, 2000; ELMARAGHY; URBANIC, 2004; SUH, 2003; ELMARAGHY *et al.*, 2012; ELMARAGHY *et al.*, 2005) afirmam que a quantidade e os diversos tipos de materiais e geometrias que os componentes de um produto apresentam, são características que podem influenciar também o aumento de sua complexidade, dado que os mesmos podem ser considerados novos componentes a serem inseridos no produto.

Em consonância, Hobday (1998), afirma que a complexidade de produtos pode ser caracterizada também com base no grau de inovação tecnológica e variedade da base de conhecimento que as empresas possuem sobre o produto. Embasado ainda nesta visão, Kotteaku *et al.* (1995), salienta que complexidade de produto pode ser proporcionada por quatro dimensões relacionadas respectivamente com a estrutura técnica do produto, sua diferenciação tecnológica, as instalações necessárias para seu desenvolvimento e os serviços de pós-venda.

Deste modo, tendo como base toda a discussão até então apresentada, onde pode-se perceber que a complexidade de produtos

pode ser compreendida e analisada sobre diversos pontos de vista. Entretanto, três atributos em específico se destacam nas discussões apresentadas pelos autores nos parágrafos anteriores, sendo eles a diversidade dos elementos, sua multiplicidade e as inúmeras interações possíveis entre estes componentes, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Atributos da complexidade de produtos

Atributos	Autores
Multiplicidade	Jacobs (2007); Jacobs e Swink (2011); Pasche (2008); Hobday (1998); Mcduffie <i>et al.</i> (1996); Elmaraghy <i>et al.</i> (2012); Elmaraghy e Urbanic (2004); Elmaraghy <i>et al.</i> (2005); Ramdas (2003); Gupta e krishinan (1999); Kaski e Heikkila (2002); Suh (2003; 2005); Lee (2003); Schulz (2008); Rodriguez-Toro <i>et al.</i> (2003); Zhu <i>et al.</i> (2008).
Diversidade	Bliss (2000); Hobday (1998); Mcduffie <i>et al.</i> (1996); Elmaraghy <i>et al.</i> (2012); Elmaraghy e Urbanic (2004); Elmaraghy <i>et al.</i> (2005); Closs <i>et al.</i> (2008); Suh (2003; 2005); Rodriguez-Toro <i>et al.</i> (2003).
Interações entre os componentes	Jacobs (2007); Jacobs e Swink (2011); Pasche (2008); Hobday (1998); Katteaku <i>et al.</i> (1995); Elmaraghy <i>et al.</i> (2012); Elmaraghy e Urbanic (2004); Elmaraghy <i>et al.</i> (2005); Kaski e Heikkila (2002); Closs <i>et al.</i> (2008); Suh (2003; 2005); Zhu <i>et al.</i> (2008).

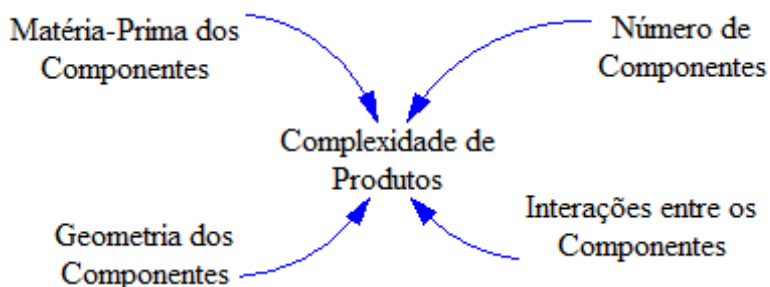
FONTE: O autor.

A multiplicidade pode ser proveniente da quantidade de elementos que um determinado produto apresente. Em relação à diversidade, McGrath (2001) afirma que ela está relacionada com aquilo que é diverso, diferente, dessemelhante, variedade, diversidade de objetos. Logo, ela pode ser compreendida por características que permitem distinção entre os componentes de um produto, como sua geometria, tamanho, tipo de material, seu estado físico, dentre outros (ELMARAGHY, *et al.* 2012; CLOSS, *et al.* 2008). Já as interações entre os componentes, estão relacionadas com as ligações existentes entre as partes de um determinado objeto, que por sua vez, geram influências recíprocas, ou seja, trata-se da conexão existente entre dois ou mais componentes de um produto, sejam elas físicas, como conexões

mecânicas, pneumáticas, por exemplo (ELMARAGHY *et al.*2005; KASKI e HEIKKILA, 2002).

Deste modo, e tendo como base os atributos da complexidade apresentados nos parágrafos anteriores, para fins desta pesquisa, a complexidade de produtos é compreendida sob o olhar de quatro elementos principais derivados dos atributos já expostos. O primeiro deles, o número de componentes é responsável pela multiplicidade. Já o atributo diversidade, pode ser representado por dois elementos, o tipo de matéria-prima dos componentes e a sua geometria. Por fim, o último atributo da complexidade de produtos é representado pelas inúmeras interações que o componente de um produto poderá apresentar. Estes quatro elementos principais da complexidade de produtos que norteiam esta pesquisa são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Elementos que caracterizam a complexidade de produtos



Fonte: O autor

Em relação ao número de componentes, reforça-se que o mesmo está atrelado com a quantidade de componentes que um produto possui em sua estrutura, podendo estes serem idênticos ou não, mas que já conhecidos e aplicados em processos dentro da produção. O que se leva então às duas outras características da complexidade de produtos, a matéria-prima e a geometria dos componentes, que são responsáveis pela diversidade dos componentes dentro dos produtos. Dado a necessidade, por exemplo, em determinado produto, do emprego de componentes plásticos, metálicos, dentre outros, assim como a necessidade de itens que possam até possuir os mesmos tipos de materiais, entretanto são dotados de geometrias distintas, e que acabam implicando em tamanhos, formas e dimensões variadas. Logo, elas podem ser compreendidas por características que permitem distinção no produto, ao passo que podem ser considerados como novos

componentes a serem adotados na estrutura do mesmo (ELMARAGHY *et al.*, 2012; CLOSS *et al.*, 2008).

Por fim, as interações entre os componentes estão relacionadas com as ligações existentes entre componentes de um produto qualquer, que por sua vez, geram influências recíprocas. Ou seja, trata-se da conexão existente entre dois ou mais componentes, sejam elas físicas, como conexões mecânicas, pneumáticas, de informação, dada a necessidade de transferência de forças entre eles (ELMARAGHY *et al.*, 2005; KASKI; HEIKKILA, 2002). No entanto, cabe salientar que existem outros fatores que podem ser empregados para caracterização e consequente aumento ou redução da complexidade de produtos, entretanto, esta pesquisa se embasará apenas nos mencionados até então.

Um deles por exemplo, trata a complexidade de produtos como uma consequência do número de produtos presentes no portfólio de uma empresa, não sendo considerado nesta pesquisa pelo fato dela analisar a complexidade de produtos com relação a variações em características internas dos produtos (JACOBS, 2007). Outra forma de compreensão e estudo desta complexidade foi estruturado com base no índice de comunalidade, desenvolvido inicialmente pelo pesquisador Collier, em 1981, e estudado ao longo do tempo por outros pesquisadores. Este índice está relacionado com a definição do número médio de componentes similares que devem ser empregados nos novos produtos, visando a padronização de seus componentes, e consequente redução da complexidade dos produtos e os efeitos que eles podem gerar nos sistemas de produção. Todavia, este índice vem sendo criticado pelo fato de não abarcar em suas medidas os componentes não similares que podem vir a fazer parte da estrutura dos novos produtos, e que são o ponto principal de incremento na complexidade destes produtos.

Como já retratado por alguns autores (BLISS, 2000; JACOBS, 2007; SUH, 2003, 2005), dentro da manufatura existem complexidades que se comunicam e influenciam umas nas outras, através de suas interações. Na busca por uma representação destas complexidades, a Figura 4 apresenta a complexidade de produtos inserida em um contexto macro, onde é possível visualizar outros tipos de complexidades, como a complexidade de processos e a complexidade operacional.

Figura 4 - As complexidades no sistema produtivo



Fonte: Adaptado de Bliss (2000); Jacobs (2007); Suh (2003, 2005)

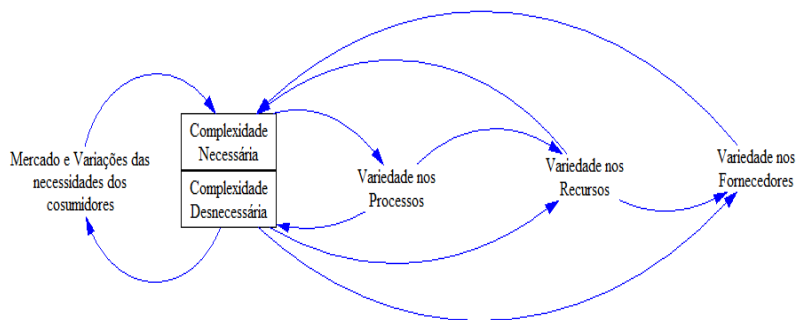
De acordo com Elmaraghy e Urbanic (2004), a complexidade de processo é uma função do produto e do volume demandado deste. Com isto, diversos elementos que fazem parte desta complexidade são envolvidos como os processos relacionados à montagem e fabricação dos produtos, equipamentos, mão-de-obra, falhas, estoques de matérias-primas e produtos, espaço-físico, qualidade, dentre outros. Deste modo, o aumento da complexidade dos produtos, automaticamente contribui para o aumento na complexidade do processo do sistema. Em se tratando da complexidade operacional, ela pode ser vista como uma função do produto, do processo e da cadeia externa da produção, ou seja, a parte de logística interna e distribuição que envolve o produto, e que foge do escopo desta pesquisa, não sendo assim discutida na mesma.

2.5. OS EFEITOS DA COMPLEXIDADE DE PRODUTOS NA PRODUTIVIDADE

Dentro dos sistemas produtivos existem diversas complexidades, como as apresentadas na Figura 4, e que são capazes de se auto influenciar, com base nas interações existentes entre elas (BLISS, 2000; JACOBS, 2007; SUH, 2003, 2005). Uma delas, a complexidade de produtos, é capaz de gerar efeitos diversos dentro de todo o sistema de produção e em seus elementos, afetando assim as demais complexidades existentes. Com isto, Danilovic e Browning (2007), Jacobs (2007) e Pache (2000), afirmam que a complexidade de produtos não somente influencia elementos da manufatura, mas é

também influenciada por estes ao longo de todo o processo produtivo, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - A complexidade de produtos e suas influências dentro da manufatura



Fonte: Adaptado de Danilovic e Browning (2007); Jacobs (2007); Pasche (2008)

Para Pasche (2000), a complexidade do produto é resultante das ações de seu desenvolvimento, decorrentes das decisões das equipes de desenvolvimento de novos produtos. O autor afirma ainda que a equipe de projeto e desenvolvimento deve conhecer bem as reais necessidades e desejos do mercado consumidor, pois estas necessidades são a base para a variação da complexidade de produtos, além de possuir domínio sobre as novas tecnologias e capacidade criativa para propor alternativas de projeto simples e de menor complexidade.

Por outro lado, outros autores (DANILOVIC; BROWNING, 2007; SUH, 2003, 2005) afirmam que o setor de desenvolvimento de produtos não consegue mensurar, identificar ou ter noção dos custos e impactos que a complexidade inserida nos produtos pode causar ao sistema de produção como um todo. Em consonância, Kinnunen (2006) e Shibata *et al.* (2003), com base em testes empíricos, afirmam que usualmente ocorre uma queda contínua da produtividade dos sistemas, à medida que a complexidade do produto, do processo e da manufatura aumentam. Em se tratando da produtividade, Ferreira (2003) afirma que ela pode ser considerada como um dos resultados mais simples de ser obtido e ao mesmo tempo mais importante para a gerência de produção.

Ainda neste contexto, Ferreira (2011) e Alberton (2006) afirmam que mesmo a produtividade tendo seu conceito apresentado sob diversas perspectivas, sua ideia principal retoma sempre para a relação

entre a produção e um ou mais de seus fatores de entrada empregados. Em consonância, diversos autores (LIKER, 2005; MARTINS; LAUGENI, 2005; MEREDITH; SHAFER, 2002; NITO, 2003; SILVA, 2010; FERREIRA, 2003; FERREIRA, 2011; ALBERTON, 2006; CARVALHO, 2002), apontam que a produtividade pode ser definida como a relação entre o que foi produzido por um sistema e os insumos em termos reais utilizados para o alcance do que foi produzido, como capital investido, mão-de-obra empregada, tempo de produção, dentre outros.

Deste modo, percebe-se que o conceito de produtividade apresentado no parágrafo anterior, diferencia-se apenas pelo *insight* de produção empregado para realizar sua análise. Em se tratando da análise da produtividade e tendo como recurso de produção, por exemplo, o tempo de trabalho ou de processamento empregado para fabricação dos produtos, autores como Nito (2003), Silva (2010), Carvalho (2002) afirmam que a produtividade de um sistema irá aumentar, se uma maior quantidade de produtos for produzida mantendo-se constante o tempo gasto para isto. Em contrapartida, um maior *lead time* produtivo para produção de uma quantidade constante de produtos demandados pelo sistema, acaba implicando em uma queda na produtividade da manufatura.

Com isto, e fazendo uma análise da Figura 5, pode-se perceber que o aumento da complexidade de produtos, gera impactos diretos na variedade, dentro de três importantes componentes do sistema produtivo, seus processos, seus fornecedores e recursos necessários para execução e produção. E que estes impactos são provenientes de dois tipos de complexidades, as necessárias e desnecessárias, sendo a necessária relacionada aos incrementos nos produtos decorrentes do objetivo de atendimento das necessidades dos clientes. Enquanto que as desnecessárias, podem ser compreendidas como os incrementos gerados nos produtos por parte da empresa, e que não serão considerados importantes pelos clientes que farão uso do produto (DANILOVIC; BROWNING, 2007).

Em complemento, Rodríguez-Toro *et al.* (2003), salientam ainda que alterações na complexidade de produtos que modifiquem, por exemplo, o design do produto, exercem papel importante nos processos de fabricação ou montagem, bem como nos custos de desenvolvimento e na qualidade do produto. Isto, converge com a afirmação de Bradous (2011), ao salientar que quanto mais complexo for o produto, mais complexo será todo o seu sistema de apoio.

Entretanto, em alguns casos, incrementos na complexidade de produtos, gerados pelo desenvolvimento de um novo design, por exemplo, podem não representar apenas efeitos negativos no sistema de produção. Isto acontece quando estes incrementos na complexidade são provocados pelos desejos e necessidades dos consumidores, implicando assim na criação de novos produtos, que podem gerar ganhos competitivos para a empresa dentro de seu mercado consumidor (ELMARAGHY *et al.*, 2012). Portanto, uma maior complexidade do produto só pode ser considerada aceitável quando a mesma resultar em um custo menor do que o consumidor estiver disposto a pagar pelo produto.

Diante do que foi dito no parágrafo anterior e com base em Danilovic e Browning, (2007), que ressaltam a importância da análise correta das complexidades necessárias e desnecessárias e seus incrementos dentro dos produtos como forma de ganhos competitivos frente ao mercado. Percebe-se então que a gestão da complexidade de produto e sua análise, não devem ser focadas apenas em sua redução, mas sim em uma eficiente gestão, através do desenvolvimento de produtos que sejam capazes de agregar valor para o cliente e para a empresa. Deste modo, percebe-se que o incremento da complexidade necessária nos produtos, mesmo gerando o aumento dos custos dos produtos para os clientes finais, é válida, desde que seja capaz de agregar valor ao consumidor (WANG *et al.*, 2011; BRADOUS, 2011; BOZARTH *et al.*, 2009).

Inúmeras são as alterações que podem ser feitas nos produtos e que irão contribuir de modo direto para o aumento ou redução de sua complexidade e consequentemente a geração de efeitos dentro dos sistemas de produção. Alguns autores (BRADOUS, 2011; ZHU *et al.*, 2008; JACOBS, 2007; BLECKER *et al.*, 2004), demonstram em seus trabalhos quais são as variáveis do sistema produtivo que a complexidade de produtos pode impactar e proporcionar perdas de produtividade.

Bradous (2011) e Zhu *et al.* (2008) mostram em suas pesquisas, que os constantes aumentos no número de componentes e suas respectivas características, como alterações de tamanhos e encaixes, por exemplo, alteram as operações necessárias para a produção dos produtos, que por sua vez, podem contribuir para a elevação dos tempos produtivos e consequentemente o *lead time* na linha de produção onde este produto esteja sendo fabricado. Este aumento nos tempos de processo pode ser explicado pelo acréscimo de novas atividades e tarefas nas operações, assim como, o período de adaptação que os

funcionários precisam para dominar estas atividades, considerando estes acréscimos de atividades em uma mesma linha de produção.

Entretanto, estes efeitos devem ser analisados com base no desempenho de produção que a linha irá apresentar ao longo do tempo, decorrente da inserção de novas etapas ou processos para produção dos itens mais complexos. Em relação a criação de uma nova linha de produção, para produção dos produtos mais complexos desenvolvidos pelas empresas, a discussão apresentada pelos autores (BRADOUS, 2011; ZHU *et al.*, 2008) permanece válida, desde que se analise, ao longo do tempo, o comportamento do desempenho operacional da linha. Dado que, uma nova linha pode conter um maior grau de tecnologia, que por sua vez, seja capaz de reduzir o tempo de processamento necessário para a produção dos produtos.

Logo, a depender do comportamento que a eficiência do processo venha a apresentar, o aumento na variedade dos componentes dos produtos, seja decorrente, por exemplo, do incremento de componentes compostos por novos materiais, acabam gerando a necessidade de novos processos produtivos. Deste modo, a depender do grau de novidade que estes componentes venham a apresentar, a necessidade de novos postos de trabalhos para o desenvolvimento do processo faz-se necessária, o que por sua vez, pode implicar também em maiores tempos para atravessamento dos componentes entre estes postos.

Em complemento, os autores (BOZARTH *et al.*, 2009; ELMARAGHY *et al.*, 2012; MACDUFFIE *et al.*, 1996) afirmam que as propriedades dos materiais empregados na composição de novos componentes dos produtos, podem afetar de modo direto o grau de novidade e tecnologia dos processos de fabricação da empresa, demandando assim um maior tempo para a realização das operações e consequentemente nos custos de produção. Custos estes, que podem ser proporcionados pela necessidade de novas contratações de mão-de-obra, equipamentos e criação de novos turnos de trabalho, visando assim, a garantia da eficiência operacional do processo.

Em uma análise do aumento na complexidade de produtos devido a um maior grau tecnológico que os produtos podem apresentar, autores como Elmaraghy *et al.* (2012), Hobday (1998) e Kotteaku *et al.* (1995), afirmam que a necessidade de inserção de determinados softwares no interior dos produtos, pode implicar na estruturação de uma linha de produção mais moderna e complexa. Com isto, embora a empresa apresente ao mercado consumidor produtos mais eficazes, versáteis e confiáveis, poderá necessitar de um processo mais

estruturado e dotado de novas características, como novos equipamentos e processos, que poderão comprometer a eficiência do sistema.

Em se tratando dos incrementos na complexidade dos produtos provenientes da inserção de componentes que possuem uma nova geometria em sua estrutura, Rodríguez-Toro *et al.* (2003), salientam que componentes com geometrias diferentes dos componentes atuais, podem contribuir para o aumento do grau de dificuldade e precisão na montagem das partes de um produto. Deste modo, a inserção destes novos componentes podem acabar contribuindo também para a elevação nos tempos padrões dos processos e suas respectivas atividades.

Na busca por uma gestão eficaz dos tempos dos processos decorrente da inserção de componentes com novas geometrias que são capazes de alterar significativamente as operações de fabricação ou montagem dos novos produtos, alguns autores (DALGLEISH *et al.*, 2000; IWAYA, 2009; ESKILANDER, 2001), buscam melhorar, controlar e reduzir os efeitos negativos que a complexidade de produtos pode vir a causar na produtividade dos sistemas com a aplicação da metodologia DFA – *Design for Assembly*.

Através desta metodologia, os autores mapeiam as atividades pertinentes a cada um dos novos componentes do produto, e conseguem assim, antes de colocar o produto em escala de produção, determinar quais componentes possuem fabricação e montagem eficientes e que agreguem valor para o processo como um todo. Com a aplicação da DFA, pode-se dizer que estar-se-ia atuando no gerenciamento da complexidade de produtos, permitindo assim a criação de vantagens competitivas para as organizações diante de seus concorrentes (WANG *et al.*, 2011; BRADOUS, 2011; BOZARTH *et al.*, 2009).

Outra forma empregada na literatura para lidar com a complexidade de produtos reside no foco da redução direta do número de componentes dos produtos, dado que, para alguns autores (BLISS, 2000; ELMARAGHY; URBANIC, 2004, SUH, 2003; ELMARAGHY *et al.*, 2012; ELMARAGHY *et al.*, 2005), este é o elemento que mais contribui para o aumento da complexidade dos produtos. Deste modo, Suh (2003) salienta que a redução do número de componentes dos produtos, sem a permuta por outros componentes mais complexos, pode melhorar o desempenho dos processos de fabricação de um modo geral, além de contribuir para a redução do tempo de processamento.

Contudo, esta redução de componentes pode vir a exigir o desenvolvimento de novos componentes detalhados, dotadas de maiores funções e conexões, em substituição aos componentes originais. Isto pode implicar na necessidade de novos materiais em sua composição, ou

uma geometria diferente que facilite a conexão de mais componentes de modo direto, sem o uso de componentes de conexão, como um parafuso. Neste caso, deve-se atentar para que a nova solução não afete a complexidade de modo a reduzir a eficiência dos processos de fabricação e montagem.

Observa-se então que a redução de componentes deve ser bem planejada, pois determinada redução pode não ser compensada pelo custo dos novos elementos do processo, provocado pela necessidade de aumento de novos recursos de produção, como pessoas, equipamentos, espaço-físico, dentre outros (DANILOVIC; BROWNING, 2007; WANG *et al.*, 2011; ZHU *et al.*, 2008).

Em uma análise do incremento de complexidade dos produtos decorrente do aumento do número de componentes, bem como das interações entre eles, alguns autores (DANILOVIC; BROWNING, 2007; ZHU *et al.*, 2008; IWAYA, 2009; BOZARTH *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2011; BRADOUS, 2011; ZHU *et al.*, 2008; JACOBS, 2007; BLECKER *et al.*, 2004; MACDUFFIE *et al.*, 1996), enfatizam que estes aumentos no número de componentes impactam de modo direto nas horas trabalhadas da produção. Tal fato pode acontecer, dependendo da nova solução adotada pois a produção poderia vir a necessitar de um maior período de tempo para ser finalizada, implicando assim no aumento gradativo do *lead time* dos sistemas de manufatura. Os mesmos autores ainda afirmam que o incremento na complexidade do produto, proveniente da adição de mais componentes e interações no produto, impacta também nos níveis de estoque de produtos e seus respectivos componentes que a empresa deve armazenar, assim como nos índices de retrabalho e inatividade da linha de produção.

Em relação aos impactos que a complexidade de produtos pode causar nos estoques das empresas, Jacobs (2007), Lee (2003), Schulz (2008) e Closs *et al.* (2008), afirmam que este é um dos elementos usualmente mais afetados pela complexidade de produtos. Com isto, Suh (2003) e Bliss (2000) defendem que para maximizar a produtividade de um sistema de produção, as complexidades presentes nele, sejam elas de produto ou processo, por exemplo, devem ser, além de reduzidas, muito bem gerenciadas.

Deste modo, e dada à convergência de ideias exposta nos parágrafos anteriores, percebe-se que as alterações na complexidade de produtos, provenientes da adição de elementos nela, seja através de novos componentes já conhecidos, com matéria-prima e geometria distintas, ou mesmo interações, podem impactar em diversos pontos dentro do sistema produtivo, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Efeitos da complexidade de produtos na manufatura

Elementos que caracterizam a complexidade de produtos	Autores	Efeitos causados na manufatura
Número de Componentes	Jacobs, 2007; Bradous, 2011; Iwaya, 2009; Madcuffie <i>et al.</i> , 1996; Bozarth <i>et al.</i> , 2009; Wang <i>et al.</i> , 2011; Danilovic e Browning, 2007; Lee, 2003; Schulz, 2008; Zhu <i>et al.</i> , 2008; Blecker <i>et al.</i> , 2004; Closs <i>et al.</i> , 2008.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do tempo de ciclo dos processos; - Aumento no <i>lead time</i> produtivo; - Necessidade de novos postos de trabalho; - Necessidade de horas extras; - Necessidade de novos turnos de trabalho; - Necessidade de mais mão-de-obra;
Matéria-Prima dos Componentes	Wang <i>et al.</i> , 2011; Zhu <i>et al.</i> , 2008; Macduffie <i>et al.</i> , 1996; Bozarth <i>et al.</i> , 2009; Bradous, 2011; Lee, 2003; Schulz, 2008; Elmaraghy <i>et al.</i> , 2012; Danilovic e Browning, 2007.	<ul style="list-style-type: none"> - Novas contratações; - Aumento dos custos de produção; - Necessidade de novos processos; - Aumento no nível de estoque de produtos acabados;
Geometria dos Componentes	Dalglish <i>et al.</i> , 2000; Bradous, 2011; Zhu <i>et al.</i> , 2008; Elmaraghy <i>et al.</i> , 2012; Rodríguez-Toro <i>et al.</i> , 2003; Lee, 2003; Iwaya, 2009; Eskilander, 2001; Danilovic e Browning, 2007; Schulz, 2008.	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento do nível de estoque de produtos em processo (<i>Work in Process</i>); - Aumento no número de componentes dos produtos necessários em estoque; - Aumentos dos índices de retrabalho e inatividade da linha de produção;
Interações entre os Componentes	Closs <i>et al.</i> , 2008; Blecker <i>et al.</i> , 2004; Zhu <i>et al.</i> , 2008; Danilovic e Browning, 2007; Wang <i>et al.</i> , 2011; Bradous, 2011; Iwaya, 2009; Bozarth <i>et al.</i> , 2009; Jacobs, 2007.	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do número e tempos de setups;

Fonte: O autor.

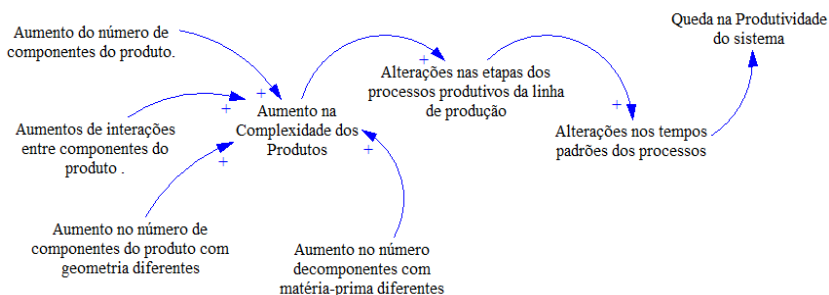
Do Quadro 2, pode-se perceber que o aumento em um dos elementos da complexidade dos produtos pode provocar possíveis

alterações nos tempos de operação dos processos produtivos. Por exemplo, o de componentes com uma nova geometria pode implicar em uma maior necessidade de *lead time* para o produto. Deste modo, tem-se que o aumento ou redução dos tempos dos processos produtivos acabam impactando diretamente na produtividade do sistema, pois quanto maior o tempo para um processamento específico, menor será a velocidade de produção que o sistema venha a apresentar, a qual, é causa direta da redução da produtividade (NITO, 2003; SILVA, 2010; CARVALHO, 2002).

Com isto, e como já apresentado no Quadro 1, este trabalho compreende que incrementos na complexidade dos produtos, através do aumento de seus elementos formadores, podem gerar diversos efeitos no processo produtivo e em sua eficiência operacional. Entretanto, compreende-se também que os incrementos na complexidade dos produtos podem afetar o tempo necessário para a realização das operações pertencentes ao processo de uma mesma linha de produção, ou criação de novas operações, que por sua vez contribuem para o aumento da complexidade do processo, afetando assim, a produtividade do sistema de manufatura.

Através da compreensão apresentada anteriormente, pode-se perceber os incrementos na complexidade do produto, decorrente sempre do aumento dos elementos desta complexidade, são capazes de gerar alterações significativas nos tempos padrões dos processos produtivos de uma linha de produção. Logo, os aumentos nos tempos dos processos dentro da linha produção que o modelo proposto busca representar, podem contribuir para uma redução da produtividade desta linha, conforme esquema apresentando na Figura 6.

Figura 6 - Inserção da complexidade de produtos na simulação



Fonte: o autor

Deste modo, a produtividade do sistema será analisada pela relação entre a quantidade de produtos que o processo é capaz de produzir em um período de tempo pré-determinado, conforme equação que segue.

$$\textit{Produtividade da linha} = \frac{\textit{Produção obtida (unidades)}}{\textit{Tempo de Produção (hora)}} \quad (1)$$

No entanto, alguns autores (NITO, 2003; SILVA, 2010; CARVALHO, 2002) afirmam que diversas podem ser as formas pelas quais pode-se analisar a produtividade de um sistema de produção. Dentre elas pode-se citar a relação entre a produção obtida e a quantidade de máquinas empregadas, ou a produção e o número de trabalhadores empregados, assim como a produção real pela produção padrão de produtos, dentre outros.

Contudo, como o modelo proposto trata-se de um modelo de simulação dinâmica, ou seja, que emprega os preceitos e lógicas da dinâmica de sistemas, a qual permite a análise do comportamento das variáveis ao longo do tempo. A Equação 1, é a que melhor se enquadra para a análise da produtividade do sistema, já que permitirá a verificação, em um determinado período de tempo, do comportamento da produtividade da linha de produção, ao passo que os incrementos da complexidade do produto são inseridos no modelo proposto.

Em se tratando da dinâmica de sistemas e suas ferramentas, as seções que seguem, buscam apresentar uma breve discussão sobre sua estrutura lógica, assim como os elementos que a compõe. Cabe salientar que o emprego da modelagem dinâmica no estudo dos efeitos da complexidade dos produtos nos sistemas dá-se pelo fato dela ser focada na análise do comportamento dos sistemas no tempo, empregando modelos que permitem uma análise tanto qualitativa, quanto quantitativa. Análises estas que permitem ao pesquisador, além da observação dos resultados numéricos, uma compreensão e entendimento dos fenômenos e efeitos entre as variáveis que geraram estes resultados. Este entendimento de efeitos e fenômenos é proporcionado pela existência e criação dos ciclos de realimentação de informações no sistema e que controlam o comportamento que o mesmo venha a apresentar.

2.6. DINÂMICA DE SISTEMAS E SEUS ELEMENTOS

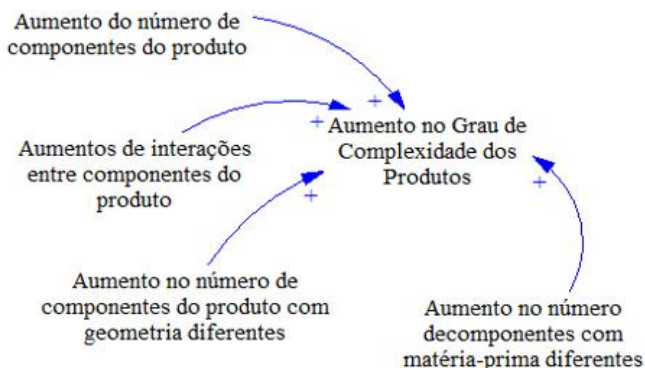
A Dinâmica de Sistemas, desenvolvida por Jay W. Forrester, na década de 50, foi criada inicialmente com o intuito de ajudar os gerentes e gestores industriais, na compreensão de seus processos, bem como facilitar a tomada de decisão. Dado esta característica, a mesma ganhou amplo espaço no meio empresarial, principalmente por seu fácil acesso através das técnicas computacionais desenvolvidas, o que por sua vez, permitiu a criação de modelos de simulação voltados para a resolução de problemas complexos (GONÇALVES, 2009; BATISTA, 2001).

Dado sua evolução e comprovada eficiência na resolução de problemas, Gonçalves (2009) afirma que a Dinâmica de Sistemas vem evoluindo como uma metodologia de análise de sistemas sociais, tendo sua utilidade aplicada em vários ramos de atividades, como por exemplo, recursos naturais, engenharia, administração, dentre outros. Esta utilidade em diversas áreas deve-se ao fato dela ter como foco principal a compreensão da estrutura básica de um sistema, compreendendo assim todo o comportamento que a mesma pode produzir (BATISTA, 2001). Para uma melhor compreensão do desenvolvimento e aplicação desta técnica, serão apresentados a seguir os principais elementos da dinâmica de sistemas.

2.6.1. Relação Causal

A relação causal trata do efeito direto que uma variável ou elemento dentro de um sistema pode provocar em outra parte pertencente ao mesmo modelo e que são, por conseguinte, interligadas entre si. Para representar graficamente esta relação causal, são comumente usadas flechas de ligação da variável causa para a variável afetada (FLORENTÍN, 2001; GARCÍA, 2001). A Figura 7 apresenta um exemplo de relação causal entre cinco variáveis.

Figura 7 - Relação Causal entre elementos de um sistema



Fonte: O autor

Através desta relação, pode-se perceber quais variáveis ou elementos interagem entre si permitindo assim uma melhor análise e compreensão do sistema como um todo, que se pretende estudar e modelar. Na Figura 7, por exemplo, a variável “Variações no Número de Componentes” causará efeitos na variável “Aumento no Grau de Complexidade dos Produtos”, sendo esta a variável afetada. Deste modo, quanto maior ou menor for a variação no número de componentes de um produto, maior ou menor será seu grau de complexidade.

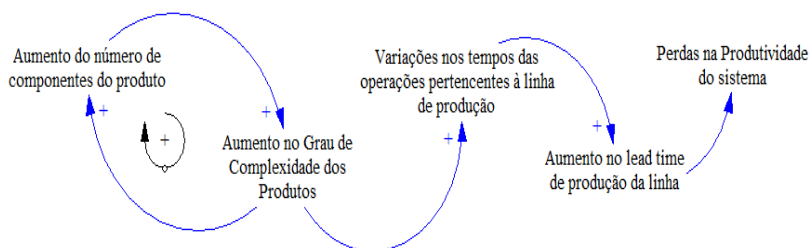
O sinal positivo “+” indica que há uma relação direta entre as variáveis, ou seja, um aumento da variável causa vai se traduzir em um incremento na variável afetada, sendo que, a relação inversa também é verdade. Já na relação negativa, representada pelo sinal negativo “-“, implica a existência de um fenômeno oposto, ou seja, com o aumento da variável causa, a variável afetada irá sofrer alterações contrárias, logo, diminuir (STERMAN, 2000).

2.6.2. Diagrama Causal

Para a construção de modelos dinâmicos, Sterman (2000) afirma que é necessário inicialmente identificar as variáveis do sistema e as relações causais existentes entre as mesmas, e em seguida partir para o entendimento das relações que existem entre elas. Com isto, os diagramas de enlace causal, permitem a visualização das diversas

relações de interdependência entre as variáveis do sistema, conforme exposto na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de Laço Causal



Fonte: Adaptado de Santos (2006)

Através da Figura 8 percebe-se que, por exemplo, a variável “Aumento do número de componentes do produto” pode afetar e é afetada positivamente pela variável “Aumento no Grau de Complexidade dos Produtos”. Logo, quanto maior for o incremento no número dos componentes de um produto, maior pode ser a complexidade do mesmo, assim como, quando uma equipe de desenvolvimento de projeto insere um aumento de 10% na complexidade de um produto, este aumento pode contribuir diretamente para o aumento do número de componentes do produto.

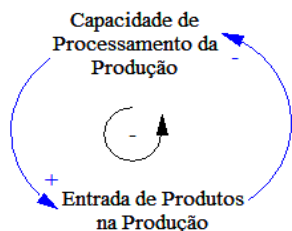
Deste modo, García (2001) afirma que os diagramas causais são imprescindíveis nos modelos dinâmicos, pois são capazes de fornecer uma visão global da estrutura causa do sistema, bem como dos seus laços causais, sendo, portanto, muito utilizado para identificação e conceituação de problemas complexos, assim como para o desenvolvimento das equações que são capazes de representar os efeitos que uma variável pode gerar nas demais (SANTOS, 2006; BATISTA, 2001).

Em se tratando dos laços causais, e de acordo com Batista (2001), eles são os principais responsáveis por todo o comportamento dinâmico que os sistemas em estudo apresentam, pois através deles é que os ciclos de realimentação de informação ocorrem, gerando assim equilíbrio e manutenção dos sistemas simulados.

Os laços que ligam dois elementos sempre são caracterizados por uma polaridade positiva ou negativa, sendo que, quando o sinal for negativo, estes descrevem processos de perseguição de metas, ou seja,

alcance de um objetivo final de equilíbrio. Enquanto que o positivo, implica polaridade positiva e representa o efeito contrário, ou seja, o aumento de uma das variáveis envolvidas implica no aumento gradativo das variáveis afetadas por ela dentro do laço, gerando assim uma desestabilização em todo o sistema analisado, conforme é apresentado na Figura 9 (FLORENTÍN, 2001; BATISTA, 2001).

Figura 9 - Laço Causal entre duas variáveis



FONTE: o autor.

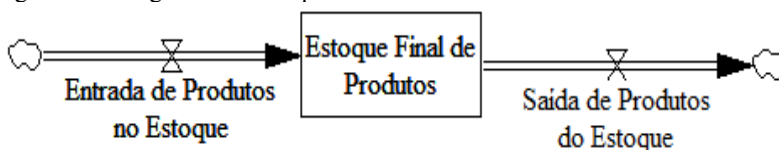
Portanto, no laço causal apresentado na Figura 9, um aumento na variável “Entrada de Produtos na Produção”, irá gerar uma redução na variável “Capacidade de Processamento de Produção”. Logo, a quantidade de produtos que poderão entrar no sistema de produção será reduzida, buscando assim manter o equilíbrio do sistema, e não enviando para a produção uma demanda superior àquela que ela seja capaz de produzir.

2.6.3. Estoques e fluxos

Para Sterman (2000), os estoques e os fluxos são os elementos chaves para uma simulação dinâmica, sendo que todo e qualquer sistema dinâmico, pode ser representado por estes dois elementos. Os estoques representam o acúmulo de algo dentro do sistema em desenvolvimento, como materiais de produção, peças, componentes, produtos acabados, informações, dentre outros. Para Santos (2006), as variáveis estoque dos modelos de simulação representam o estado que o mesmo se encontra, como por exemplo, uma variável que demonstra a quantidade de produtos que está sendo produzida no instante “t” em uma linha de produção. Através do conhecimento desta informação, os responsáveis pelo processo produtivo podem visualizar quanto de capacidade de disponível, naquele momento, o processo ainda dispõe.

Por sua vez, as variáveis de fluxo, são as responsáveis pelas retiradas ou incrementos de informação ou material dentro das variáveis de estoques, criando assim ações ou mudanças de estado nos sistemas analisados (BATISTA, 2001). Já as interligações entre estes dois tipos de variáveis permitem a criação dos diagramas de estoque e fluxos, conforme apresentado na Figura 10. Tais diagramas permitem a criação e desenvolvimento de modelos computacionais que possibilitem a análise do comportamento dos sistemas ao longo do tempo. Estes modelos também podem ser desenvolvidos com o auxílio de softwares de simulação, como, por exemplo, o Vensim PLE, o PowerSim, o STELLA e o DYNAMO.

Figura 10 - Diagrama de Estoques e Fluxos



Fonte: Adaptado de Santos (2006)

O Vensim, em sua versão acadêmica, é um software de simulação dinâmica aberto, e composto por um conjunto de sistemas de equações diferenciais que permitem a análise do comportamento das variáveis e do sistema como um todo. Através deste software, os diversos tipos de variáveis que a simulação dinâmica necessita podem ser empregados, como as variáveis de fluxo, estoques, controle, defasagem, dentre outras. Deste modo, e com base nestas características, salienta-se que para fins de modelagem deste trabalho, o software Vensim PLE foi utilizado (ARIENTE, 2013; SANTOS, 2006).

2.6.4. Atrasos

Dentro da dinâmica de sistemas, os atrasos estão presentes em todos os modelos, na qual a resposta que uma variável afetada pode apresentar não ocorre no mesmo instante que a sua variável causa. Deste modo, os *delays* podem representar o tempo necessário para que dois estados distintos sejam observados nas variáveis afetadas, ou um período de tempo necessário para que um processo de tomada de decisão seja realizado e seus efeitos percebidos no sistema.

Dentro dos modelos de simulação desenvolvidos com base na dinâmica de sistemas, dois tipos de atrasos podem existir, os de material e os de informação. O primeiro deles é totalmente relacionado com o fluxo físico dentro do modelo, ou seja, os estoques intermediários que podem ser gerados entre dois processos. Enquanto que os de informação representam os ajustes graduais que o modelo pode sofrer ao longo do processo de simulação (SANTOS, 2006; FLORENTÍN, 2001).

Em se tratando do uso destes dois tipos de atrasos no modelo proposto, salienta-se que, os relacionados com o fluxo físico, ou seja, os atrasos materiais, serão empregados nas variáveis responsáveis pela produção dos produtos nas células de produção. Por outro lado, os atrasos de informação, são mais aplicados em pontos que visem representar a possibilidade de um atraso quanto ao processo de tomada de decisão, como por exemplo, o tempo necessário para que uma ordem de produção seja alterada, ou mesmo, uma variação na demanda de mercado seja sentida pela gerência.

2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se uma discussão sobre o termo complexidade e seus elementos formadores, de onde pode-se perceber que não existe atualmente na literatura, um conceito único e geral aceito para o mesmo. Também apresentou-se uma discussão sobre a complexidade de produto, seus diversos conceitos, e os quatro elementos principais que a caracterizam. Diante disto, atinge-se o objetivo de identificar os elementos que influenciam e caracterizam a complexidade de produtos, os quais são elementos fundamentais para a continuação desta pesquisa, sendo que os mesmos são a base para a geração de incrementos aditivos no grau de complexidade dos produtos. E consequente análise dos efeitos que estes incrementos podem gerar na produtividade da manufatura.

Em complemento, foi apresentado também uma discussão dos possíveis efeitos que os incrementos aditivos nos elementos que caracterizam a complexidade dos produtos podem gerar nos sistemas de produção. Deste modo, este capítulo contribuiu também para o alcance do objetivo que visou a identificação das variáveis do sistema produtivo que poderiam sofrer algum tipo de impacto decorrente dos incrementos na complexidade.

O alcance do objetivo apresentado no parágrafo anterior, foi de fundamental importância, pois as informações levantadas foram a base para o desenvolvimento e estruturação dos diagramas causais que serão

apresentados no capítulo seguinte. Diagramas estes que permitiram à pesquisa o desenvolvimento do modelo de simulação proposto por este trabalho, conforme será apresentado no capítulo três.

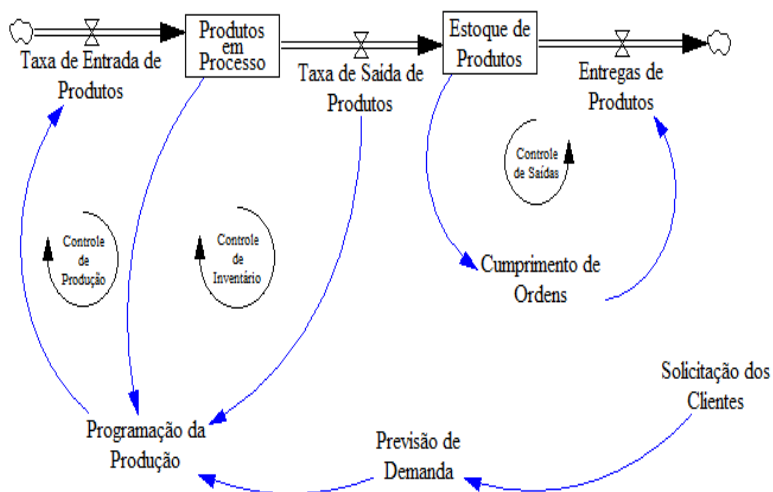
3. MODELO PROPOSTO

O modelo de simulação proposto neste trabalho teve como fonte principal de informações a pesquisa bibliográfica apresentada no capítulo dois, na qual foram analisados estudos de casos e pesquisas embasadas na dinâmica de sistemas, e na análise das influências da complexidade de produtos dentro dos sistemas produtivos.

3.1. CONDUÇÃO DA MODELAGEM

A estruturação do modelo se inicia com a definição da demanda por produtos criada pelo mercado consumidor, que será responsável pela estruturação dos estoques de segurança, assim como, pela quantidade de produtos que deve ser entregue aos clientes finais. Ao longo de todo este processo, pelo qual esta informação percorrerá e influenciará o processo de decisão, cabe salientar que o comportamento no tempo das variáveis será analisado através de suas interações apresentadas. Estas interações entre elementos podem ser visualizadas através do modelo genérico de um sistema produtivo apresentado na Figura 11, desenvolvido por Sterman (2000).

Figura 11 - Modelo Genérico para um Sistema de Produção



Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

Ainda de acordo com Sterman (2000), o modelo da Figura 11 representa os principais elementos que uma estrutura de produção de bens deve apresentar, englobando elementos desde a coleta dos dados brutos de demanda de mercado, por meio da variável “Solicitação dos Clientes”, bem como seu planejamento através da variável “Previsão de Demanda”. Em sequência, pode-se notar todo o processo pelo qual o produto passará, sendo este iniciado através da variável “Taxa de Entrada de Produtos”, que será responsável pela entrada de insumos no processo produtivo, entregando como resposta a quantidade de produtos fabricados, através da variável “Taxa de Saída de Produtos”. A “Taxa de Saída de Produtos” será a responsável pelo abastecimento de produtos na variável “Estoque de Produtos”, finalizando o processo com a variável “Entrega de Produtos”, que apresentará a quantidade de itens que serão retirados do sistema e entregues ao mercado.

Para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho foi utilizado o modelo genérico de produção apresentado na Figura 11. Esta escolha se justifica, pois os modelos apresentados por Sterman (2000), esboçam detalhadamente o envolvimento e as relações de causa e efeito existentes entre as variáveis empregadas, que por sua vez, permitem a estruturação e compreensão de todo o processo produtivo de uma linha de produção.

Em complemento a isto, torna-se importante mencionar que todos os modelos desenvolvidos por Sterman (2000), foram construídos através de um conjunto de dados coletados de experiências práticas na manufatura, que por sua vez, dão aos modelos genéricos desenvolvidos pelo autor uma maior segurança de simulação e validação para uso. Segurança esta que tornou a modelagem criada por Sterman (2000) uma das mais empregadas na literatura, como base para o desenvolvimento de modelos dinâmicos para análise do comportamento apresentado por sistemas de produção.

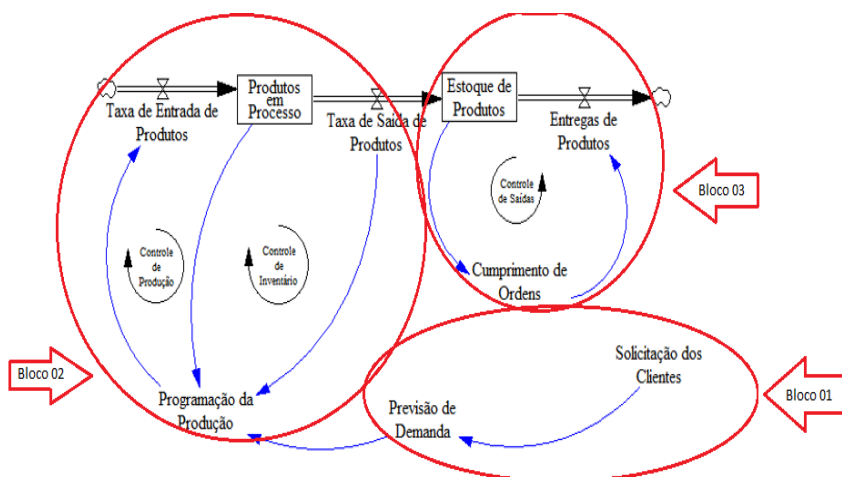
3.2. MODELAGEM CONCEITUAL

Através da Figura 11 apresentada na sessão anterior deste capítulo, e com base em todo o referencial teórico analisado sobre complexidade de produtos e seus efeitos nos sistemas produtivos, é apresentado no decorrer desta sessão um conjunto de modelos conceituais (diagramas causais) que buscam expor, com um nível maior de detalhamento, as possíveis relações existentes entre a complexidade de produtos e as variáveis do sistema produtivo. O que por sua vez, contribui para uma melhor compreensão dos efeitos da complexidade na

manufatura já apresentados no Quadro 2, permitindo assim o desenvolvimento do modelo proposto.

Deste modo, o modelo genérico exposto na Figura 11 será apresentado em blocos contendo diagramas causais que representam as relações de causa e efeito entre as variáveis do sistema de produção e a complexidade de produtos obtidas com o desenvolvimento desta pesquisa. Para fins de uma melhor compreensão de desenvolvimento do trabalho, a Figura 12 apresenta a segmentação aplicada no modelo genérico da Figura 11.

Figura 12 - Segmentação do Modelo Genérico



FONTE: O autor.

Com base nesta segmentação, as seções que seguem apresentam um maior detalhamento de cada um destes blocos expostos na Figura 12.

3.2.1. Segmentação do Bloco 01

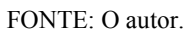
Através de uma visão mais detalhada, este primeiro bloco de segmentação apresenta as relações de causa e efeito identificadas e que contribuem para as variações que a demanda por produtos possa vir a

culminando sempre com a elevação do grau de complexidade e convergindo assim com as afirmações de alguns autores (HOOLE, 2006; BRADOUS, 2011; GOTTFREDSON; ASPINALL, 2005), que afirmam que as necessidades dos clientes e inovações tecnológicas são fatores que contribuem ao longo do tempo para o aumento da complexidade nos produtos.

Através destas alterações nas necessidades dos clientes, seja pela complexidade e suas variações, ou mesmo por fatores advindos do mercado consumidor, conforme exposto no mapa causal da Figura 13. Pode-se notar que os efeitos são sentidos ao longo do processo, propagando-se de modo direto e indireto entre as diversas outras variáveis presentes no mapa, e que são responsáveis pelo comportamento que a variável “Previsão de Demanda” possa vir a apresentar. Em se tratando da variável “Previsão de Demanda”, pode-se notar que ela é a responsável pelo início do processo produtivo dos produtos do sistema em modelagem, logo, os efeitos sentidos por ela, em decorrência das alterações de comportamento das variáveis que a influenciam, serão propagados e sentidos dentro do sistema em modelagem, influenciando assim as variáveis pertencentes ao bloco 02 da Figura 12 como será apresentado na seção a seguir.

3.2.2. Segmentação do Bloco 02

Em sequência à modelagem conceitual, e tendo como base a fragmentação do modelo genérico da Figura 12, em junção com o detalhamento do bloco 01 apresentado na Figura 13, pode-se notar que através da variável “Previsão de Demanda”, o processo produtivo do sistema pode ser iniciado, tendo como foco a produção de produtos que atendam completamente a demanda de mercado solicitada. Com base nisto, as Figuras 14 e 15 demonstram com mais detalhes o segundo bloco de segmentação.



Estes autores afirmam que os efeitos que os incrementos da complexidade podem gerar dentro da manufatura são provenientes dos setores de desenvolvimento de produtos, e provocados muitas vezes, pela busca constante de alinhamento entre o atendimento das necessidades dos clientes e a elevação constante da complexidade, principalmente pela criação de novas funções que podem culminar com o desenvolvimento de novos produtos.

O diagrama causal da Figura 14 buscou demonstrar, através de suas relações causais, que alterações na complexidade dos produtos pode implicar em alterações na estrutura do produto. Deste modo, esta estrutura do produto, ou seja, a forma como os componentes dos produtos estão distribuídos e interligados entre si, e suas possíveis alterações são capazes de gerar efeitos diversos dentro de todo o processo produtivo. Dentre estas alterações, pode-se citar, por exemplo, o fato de um novo produto possuir em sua estrutura componentes dotados de materiais primas novas para o processo. Estes novos componentes podem então acarretar a geração de novas ordens de compras dentro do processo, bem como necessitar da empresa a necessidade de formação de parcerias com novos fornecedores destes componentes em específico. Em junção a este efeito, e em decorrência do aumento da variedade dos componentes que podem compor a estrutura do produto, o mapa conceitual exposto na Figura 15 demonstra também que esta variedade de componentes, implica em efeitos em outras variáveis relacionadas com o processo de compra e aquisição de materiais para a produção.

Uma delas, reside no volume de espaço físico que estes novos componentes passarão a demandar dentro da manufatura, ao passo que quanto maior for a variedade de itens em estoque, maiores serão os espaços necessários para tal armazenamento. Em complemento, a variedade de componentes para composição de produtos, implica em um possível aumento do número de pedidos feito aos fornecedores, ocasionando assim a necessidade de uma melhor e mais eficiente gestão das entregas programadas de material. Dado que, o não cumprimento de entregas pelos fornecedores, poderá ocasionar a parada da produção por falta de insumos, fazendo deste modo com que a relação de confiança e parceria existente entre a empresa e seus fornecedores torne-se delicada, podendo culminar com o cancelamento de contratos. E o aumento de cancelamentos de contratos, pode implicar assim no aumento do número de fornecedores que as empresas devem ter em portfólio, visando assim a possibilidade de garantia de entrega de seus insumos nos prazos definidos, sem a geração de prejuízos no processo produtivo.

Atrelado a isto, e a depender da característica que o produto possa vir a apresentar, a linha de produção necessita passar por alterações pontuais, como a introdução de novos processos e operações, ou mesmo a aquisição de novas máquinas e ferramentas. Em relação a isto, ao passo que novos equipamentos e processos são necessários para que o novo produto seja produzido em uma linha de produção, tem-se neste ponto também mais um efeito gerado pelos incrementos na complexidade de produtos, o aumento do número de setups, por exemplo. Ao passo que novas etapas produtivas são inseridas no processo da linha, pode-se ter a necessidade de mudanças de ferramentas, gabaritos ou peças nos equipamentos, o que por sua vez, acabam implicando em um maior *lead time* produtivo para o produto. Em complemento, o aumento do número de setups no processo, implica também no aumento não apenas do número de paradas que a linha possa vir a ter, mas também no período de tempo que estas paradas demandem. As quais, atreladas ao incremento de complexidade nos produtos, podem reduzir a velocidade de produção do sistema, implicando assim em possíveis quedas na produtividade da linha, e a possibilidade de uma redução na capacidade de entrega de produtos para o mercado consumidor.

Estas paradas de produção, sejam elas em decorrência de um maior número de setups na linha, ou mesmo, em decorrência da elevação do número de falhas dos equipamentos em processo, ocasionadas por exemplo, pela falta de manutenção dos equipamentos, ou mesmo incapacidade técnica dos operadores podem contribuir para a queda de confiabilidade do sistema como um todo. O que por sua vez, é capaz de gerar perdas produtivas na linha, podendo culminar assim com a não produção da demanda solicitada, bem como o aumento do índice de retrabalhos dos produtos em processo. Logo, pode-se notar então que a existências destes possíveis problemas em linha, mesmo que gerados de modo indireto no sistema produtivo, estão relacionados com os incrementos que a complexidade de produtos pode gerar na estrutura dos produtos.

Ainda com relação à necessidade de novos equipamentos na linha, e a depender do seu nível de automação, pode-se deduzir que o número de funcionários em linha possa aumentar, em decorrência da necessidade iminente de mão de obra mais especializada e qualificada. Entretanto, a necessidade de mais mão de obra no processo pode surgir também pela necessidade de criação de novos postos de trabalho em linha, culminando assim no aumento dos custos operacionais e possível redução de produtividade da linha.

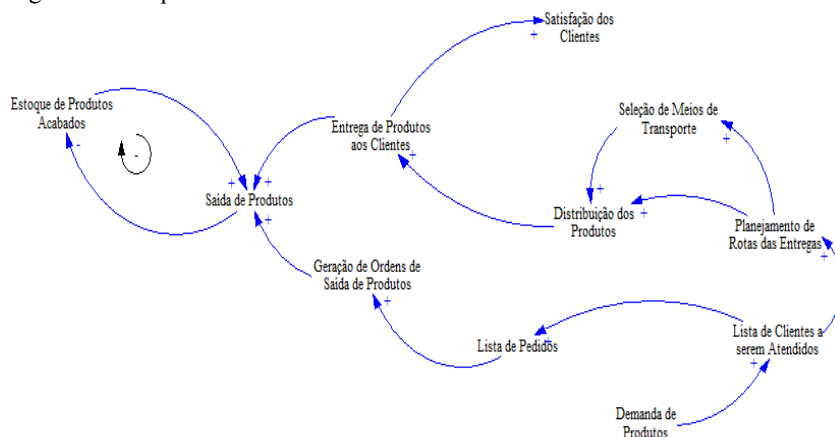
Como ponto, para possíveis ganhos de produtividade no processo, bem como aumento da capacidade produtiva da linha, pode-se optar pela criação de novos turnos de trabalho. Com isto, busca-se então que toda a demanda solicitada de produtos seja produzida e entregue a seus clientes finais dentro do prazo estipulado, obtendo assim melhores índices de satisfação do cliente e consequente fidelização de vendas.

Os mapas apresentados nas Figuras 14 e 15, apresentam em sua estrutura ciclos negativos, ou seja, ciclos de equilíbrio, os quais fazem com que o sistema busque sempre manter um equilíbrio em seu comportamento, garantindo assim a manutenção e estabilidade dele ao longo do tempo (STERMAN, 2000). Um destes ciclos, por exemplo, relaciona as variáveis “Produtos em Processo” e “Estoque de Produtos Acabados”, responsáveis pelo mecanismo de produção da manufatura, fazendo com que o sistema não produza produtos além da quantidade necessitada pelo mercado, ou necessária para suprir a demanda interna de seus estoques (FLORENTÍN, 2001; GONÇALVES, 2009). O outro ciclo negativo, envolvendo as variáveis “Capacidade de Produção” e “Realização da Produção” que culmina com a entrega de produtos acabados para a distribuição, tem por objetivo garantir que seja enviado para processamento apenas a quantidade de produtos que o sistema seja capaz de produzir. Com isto, evita-se que ordens de produção que não possam ser cumpridas em um determinado prazo pré-estabelecido, sejam emitidas para o setor de produção, gerando assim transtornos maiores dentro do processo produtivo.

3.2.3. Segmentação do Bloco 03

De posse dos modelos causais apresentados nas Figuras 14 e 15 da sessão anterior, e utilizando a variável “Estoque de Produtos Acabados” como entrada principal, o diagrama causal apresentado na Figura 16 foi estruturado.

Figura 16 - Mapa causal do bloco 03



FONTE: O autor.

O modelo causal da Figura 16 busca representar as interações existentes entre as variáveis do sistema responsáveis pela retirada de produtos do ambiente fabril e sua efetiva entrega aos clientes, tendo como base a variável “Demanda de Produtos”. Esta variável informa ao sistema a quantidade de produtos que deve ser entregue ao consumidor, e através dela, pode-se também conhecer os clientes que devem receber os produtos. Com isto, a empresa passa então a planejar o processo de distribuição dos produtos aos clientes finais, reduzindo com isto, a quantidade de produtos acabados em estoque.

Ao passo que produtos são retirados do estoque e enviados para distribuição aos clientes finais, através da influência que a variável “Saída de Produtos” exerce na variável “Estoque de Produtos Acabados”, o nível desta última variável começa a decair, logo, tem-se neste ponto a presença de mais um ciclo de equilíbrio (negativo). O qual, faz com o que sistema mantenha seu equilíbrio, ou seja, não acumulando produtos em excesso em seu estoque, e permitindo assim com que a gerência de produção consiga visualizar o comportamento de seus estoques frente às suas saídas de produtos, utilizando esta informação para o eficiente planejamento da programação das ordens de produção da linha. Logo, a linha de produção produzirá apenas a quantidade de produtos necessária para que as demandas dos clientes sejam atingidas e os níveis de estoques de segurança do processo sejam mantidos, evitando assim o não cumprimento de todas as demandas solicitadas.

Com base então no modelo genérico apresentado na Figura 11 e seus respectivos desmembramentos apresentados através das Figuras 13, 14, 15 e 16, as diversas interações existentes entre as variáveis de um sistema produtivo compreendidas nesta pesquisa puderam ser visualizadas. E através destes desmembramentos, que demonstraram também o ponto onde a complexidade de produtos é introduzida dentro do sistema de produção, pode-se perceber que os incrementos em um ou em todos os seus quatro elementos característicos refletem ao longo das interações expostas os efeitos já apresentados no Quadro 2, salientando que estes podem ocorrer de modo direto ou não.

Entretanto, as diversas interações que as variáveis do sistema produtivo possuem, acabam por sua vez propagando os efeitos destes incrementos da complexidade ao longo de todo o processo produtivo. Deste modo, inúmeros outros efeitos podem coexistir dentro de todo o processo e que não foram apresentados no Quadro 2, por exemplo, em decorrência do fato desta análise macro ser tão complexa quanto o estudo da própria complexidade em questão, ao passo que “n” variáveis sob “n” pontos de vistas podem ser geradas e inseridas nos modelos causais apresentados.

Dentre estes efeitos que não foram mencionados, tem-se que o aumento no número de componentes de um produto qualquer, por exemplo, seja este aumento de componentes padrões, ou mesmo decorrente da inserção de componentes com características novas, como uma geometria distinta, acabam por sua vez impactando também no espaço físico ocupado para estoque tanto de produtos acabados como de materiais e componentes. Esta nova necessidade de espaço físico pode assim contribuir para o aumento dos custos operacionais, dado que novos espaços precisam ser adquiridos para que todos os componentes e produtos novos sejam armazenados, antes de sua efetiva distribuição ou saída. Esta nova necessidade contribui também para o aumento da complexidade da gestão de portfólios de produtos da empresa, bem como todo o planejamento de sua produção, em decorrência da seleção de qual produto deve ser produzido primeiro ou não.

O desenvolvimento de todos estes modelos causais, que juntos representam a compreensão das relações entre as variáveis de um sistema produtivo identificadas por esta pesquisa, foi a base para o desenvolvimento da modelagem estrutural do modelo proposto, sendo que para fins de simulação, o modelo proposto buscou abarcar parte deste contexto operacional, dando ênfase principalmente ao processo produtivo, objetivando assim a estruturação de um modelo que represente uma linha de produção Flow Shop. Deste modo, as alterações

na complexidade dos produtos não alteram as etapas do processo produtivo do produto, dado que a sequência de processamento dos produtos dentro das células produtivas é a mesma, mas apenas os tempos de processamento dos produtos dentro de cada uma das células de produção que compõem o modelo proposto desenvolvido.

E as alterações nestes tempos padrões, tendo como base as relações de causas e efeitos apresentados nos mapas causais expostos anteriormente, são capazes de gerar efeitos diversos dentro do sistema produtivo, como por exemplo, produção de lotes menores de produtos, um *mix* de produção mais diversificado, maior número de setups, variação no *lead time* produtivo, aumento da ocupação de máquinas e mão de obra, redução da velocidade de produção, aumento da quantidade de produtos em processo, dentre outros.

Deste modo, percebe-se então um alinhamento entre os efeitos apresentados anteriormente, que podem ser gerados por variações nos tempos de processamento dentro das células de produção com os efeitos apresentados nos mapas causais provenientes de alterações na complexidade de produtos. Isto, por sua vez, justifica assim o uso do tempo como principal parâmetro na simulação que permitiu a verificação dos efeitos da complexidade de produtos na produtividade do sistema de produção em estudo.

3.3. MODELAGEM ESTRUTURAL

Através dos diagramas causais apresentados na seção anterior, bem como de todo o referencial bibliográfico analisado e os diversos modelos genéricos de gestão de estoques apresentados nos trabalhos de Stermann (2000), o modelo proposto nesta pesquisa foi desenvolvido, sendo que toda sua lógica computacional será desenvolvida com o auxílio do software Vensim® PLE, versão 6.3, da Ventana System Inc.

A estrutura do modelo foi desenvolvida aplicando-se os diagramas de fluxo e estoques disponíveis no próprio software de simulação, suas ferramentas gráficas, assim como algumas equações diferenciais próprias para criação de ambientes dinâmicos. Para a modelagem estrutural, algumas variáveis apresentadas nos diagramas causais sofreram algumas alterações em suas terminologias, bem como foram incorporadas outras variáveis junto a elas, objetivando obter uma lógica coerente para simulação e alcance dos objetivos almejados. Como por exemplo, a variável “Demanda de Mercado” do diagrama causal da Figura 11 é representada no modelo da Figura 17, pelas variáveis “Demanda de Produtos”, “Ajustes na Previsão de Demanda”, “Tempo

para Correção da Previsão de Produtos” e na “Previsão de Demanda do Produto”.

Com relação ao processo de simulação para composição das variáveis de estoque que são alimentadas pelas variáveis de fluxo do sistema, optou-se pelo uso do método de integração de Euler. Este método foi selecionado por tratar-se de um dos métodos mais práticos e eficiente para integrar numericamente um conjunto de equações diferenciais, assim como ser um dos métodos mais adotados por Sterman (2000) em suas modelagens, bem como nas pesquisas de outros trabalhos (BATISTA, 2001; GONÇALVES, 2009; SANTOS, 2006; FLORENTÍN, 2001; ARIENTE, 2013), os quais serviram de base para a verificação do modelo proposto que será apresentada no capítulo quatro.

Neste caso, e segundo instruções do software Vensim, recomenda-se a utilização de um tempo de integração de aproximadamente $1/3$ do valor da menor constante de tempo adotado na modelagem. Deste modo, ao se fazer alterações nos tempos de modelagem, deve-se sempre levar em consideração o fato de que o menor valor definido para o processo, deve ser, pelo menos 3 vezes maior que o tempo adotado para o passo de integração. Dado que, o não respeito a esta recomendação do software, pode provocar o surgimento de oscilações e possíveis erros de simulação, levando assim à obtenção de resultados pouco confiáveis.

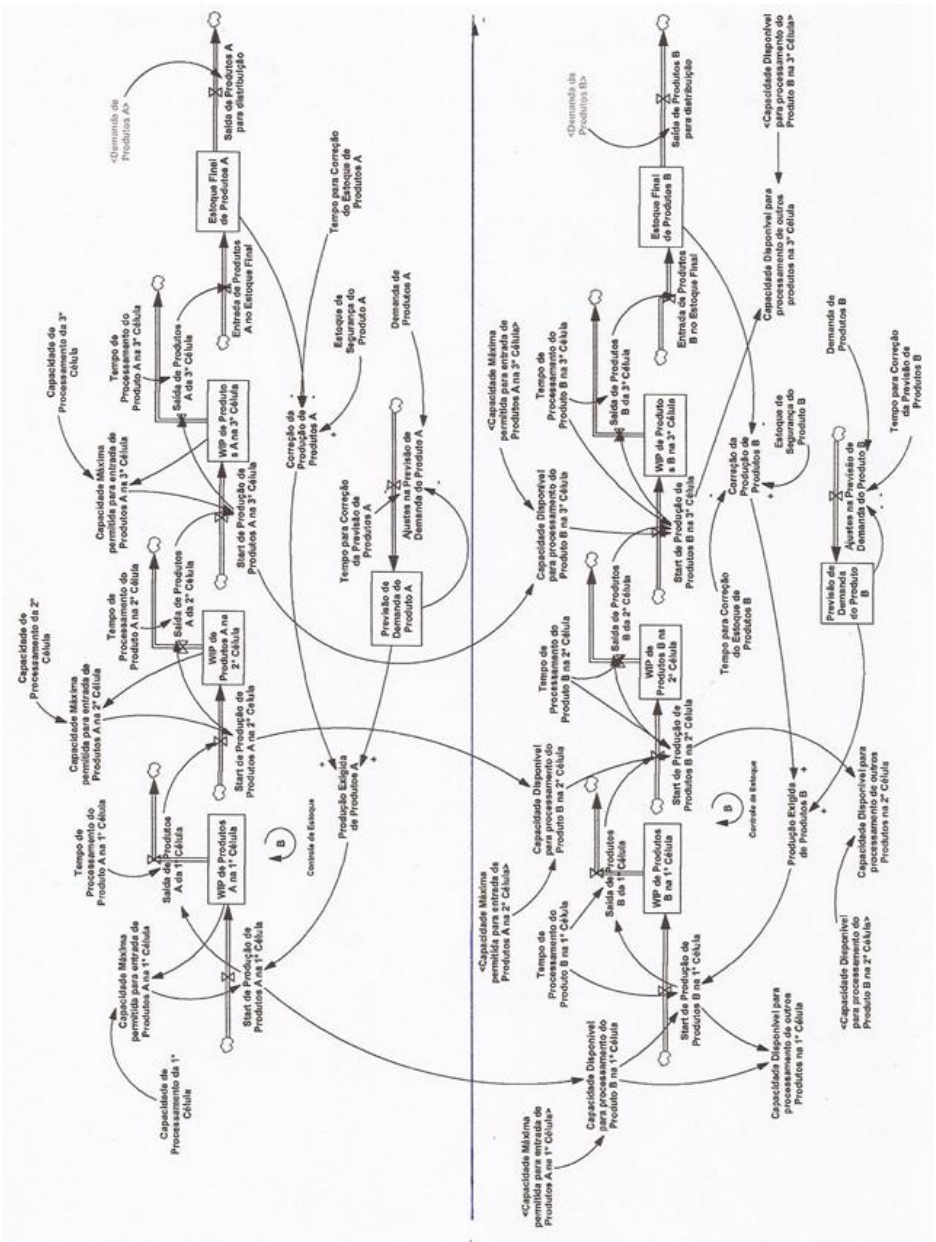
O modelo de simulação proposto é composto por dois grandes blocos interligados, no qual cada um deles possui o seu conjunto de variáveis estoques e fluxos. O modelo será apresentado ao longo do trabalho de dois modos, primeiro a Figura 17 apresenta a visão geral do modelo, com todas as variáveis envolvidas. Logo em seguida ele será desmembrado e apresentado em partes, na qual cada uma delas apresentará seu respectivo conjunto de fluxos e estoques pertinentes ao seu funcionamento e simulação, dotados de uma nomenclatura própria que melhor expresse sua representação.

O modelo mostrado na Figura 17 representa uma linha de produção genérica que possibilita a fabricação de produtos diferentes. Observa-se que a linha foi dividida em dois grandes blocos, mas que representam uma única linha de produção. O modelo considera também que a complexidade dos produtos se dá por alterações nos elementos que a caracterizam e que por sua vez, serão sentidas através das mudanças nos tempos padrões de cada uma das células presentes no modelo, conforme já discutido na modelagem conceitual. A variação na estrutura dos produtos, como já exposto no capítulo dois, ocorre devido a uma alteração nos componentes nos produtos. Seja pela inserção de novos

componentes com geometrias ou matéria-prima diferentes, ou pelo aumento da quantidade de componentes e de interações entre os componentes do produto.

Como já mencionado no capítulo dois, o modelo deve permitir a verificação dos efeitos que variações na complexidade dos produtos podem causar dentro do sistema produtivo, e que por sua vez, impliquem em queda de produtividade no mesmo. Deste modo, dada a Equação 1 de produtividade apresentada no segundo capítulo, os efeitos gerados pelos incrementos na complexidade de produtos na produtividade serão analisados através da quantidade de produtos que o processo foi capaz de produzir em um prazo pré-estabelecido. Este prazo para produção da demanda, que será apresentado no capítulo quatro deste trabalho, foi adotado tomando-se como base o tempo em que o sistema de produção é capaz de produzir toda a demanda solicitada de um produto adotado como base, para fins de simulação e análise dos efeitos que os incrementos em sua complexidade pode causar na produtividade.

Figura 17 - Modelo proposto



Fonte: O autor

Com isto, e visando uma melhor compreensão da modelagem, a Figura 18 apresenta um diagrama causal que ilustra onde os efeitos ocasionados pelas variações na complexidade de produtos podem ser sentidos dentro do modelo. Também, busca-se apresentar onde o incremento da complexidade de produtos é inserido dentro do modelo, dada suas alterações pela equipe de desenvolvimento de produtos.

Figura 18 - Efeitos da Complexidade de Produtos no Sistema Produtivo



Fonte: O autor

Antes da apresentação dos diagramas de fluxo e estoques do modelo e seus respectivos detalhamentos, é preciso destacar o Quadro 3, que apresenta uma descrição das variáveis empregadas na construção do modelo.

Devido à nomenclatura similar empregada nas variáveis, o Quadro 3 apresentará as variáveis de um modo resumido e sem muitas repetições. Como por exemplo, a variável “Demanda de Produtos”, será empregada para a descrição de duas variáveis dentro do modelo, a “Demanda de Produtos A” e a “Demanda de Produtos B”.

Quadro 3- Descrição das Variáveis do Modelo

Variáveis de Análise	Definição	Variáveis influenciadas
Demanda de Produtos	Quantidade de produtos demandado para a empresa.	Previsão de Demanda dos Produtos
Previsão de Demanda dos Produtos	É a quantidade de pedidos, ajustada com base nas expectativas de adequação da empresa.	Produção Exigida de Produtos
Ajustes na Previsão de Demanda	Ajustes necessários na demanda, com base em uma taxa de variação estipulada ao longo do tempo pela organização.	Previsão de Demanda dos Produtos
Tempo para Correção da previsão de Produtos	Período de tempo necessário para que as variações na demanda sejam sentidas dentro da organização.	Previsão de Demanda dos Produtos
Produção Exigida de Produtos	É a quantidade de produtos necessários, dado uma atualização constante com base na quantidade de pedidos já em estoque.	Start de Produção de Produtos na Célula
Start de Produção de Produtos na Célula	Quantidade de produtos que entram na célula de produção para processamento.	Saída de Produtos da Célula; WIP de Produtos na Célula
WIP de Produtos na Célula	Quantidade de Produtos que está em processo de transformação na célula.	Saída de Produtos da Célula; Capacidade Máxima permitida para Start de Produção de Produtos na Célula
Saída de Produtos da Célula	Quantidade de produtos processada pela célula de produção.	Start de Produção de Produtos na Célula; Entrada de Produtos no Estoque Final
Capacidade Máxima permitida para Entrada de Produtos na Célula	Quantidade possível de insumos que podem entrar na célula para ser processada em um determinado momento dada à quantidade que já está em processo.	Start de Produção de Produtos na Célula

(Continua)

(Continuação do Quadro 3)

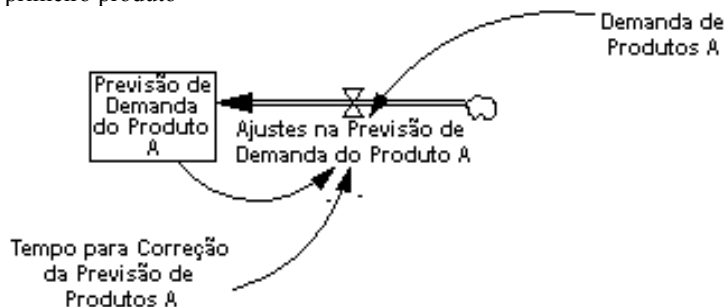
Variáveis de Análise	Definição	Variáveis influenciadas
Capacidade de Processamento da Célula	Quantidade máxima de produtos que a célula é capaz de processar, este valor usualmente é estimado pela capacidade nominal dos equipamentos presentes nela.	Capacidade Máxima permitida para Entrada de Produtos na Célula
Tempo de Processamento do Produto na Célula	Tempo necessário para que o produto seja concluído dentro da célula, dados os processos pelo qual o mesmo deva passar.	Saída de Produtos da Célula
Capacidade Disponível para Processamento de Produtos na Célula	Quantidade de produtos que a Célula ainda pode processar, dado sua utilização atual em um determinado momento.	Start de Produção de Produtos na Célula
Entrada de Produtos no Estoque Final	Quantidade de produtos acabados que entra em estoque, para distribuição e/ou armazenamento.	Estoque Final de Produtos
Estoque Final de Produtos	Quantidade de produtos acabados em estoque no sistema.	Saída de Produtos para Distribuição; Correção da Produção de Produtos
Estoque de Segurança	Quantidade mínima de produtos em estoque que o sistema deve possuir.	Correção da Produção de Produtos; Estoque Final de Produtos
Correção da Produção de Produtos	Quantidade de produtos que devem ou não ser inseridos na produção exigida, objetivando sempre manter estoque suficiente para atendimento das necessidades da empresa.	Produção Exigida de Produtos
Tempo para Correção do Estoque de Produtos	Período de tempo necessário para que variações no estoque sejam sentidas dentro do sistema e corrigidas.	Correção da Produção de Produtos

Fonte: O autor

3.3.1. Diagramas de Fluxos e Estoques do modelo proposto

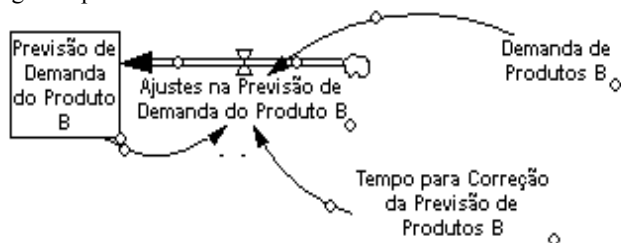
Após a explanação de todas as variáveis empregadas no modelo, assim como, a apresentação das variáveis que são afetadas, parte-se agora para a apresentação e discussão dos diagramas de fluxos e estoques desenvolvidos. Como o modelo foi desenvolvido para a produção de no máximo dois produtos distintos, as Figuras 19 e 20 apresentam os diagramas de fluxo e estoques responsáveis pela geração da previsão de demanda dos dois itens dentro do sistema.

Figura 19 - Diagrama de fluxo e estoque para a Previsão da Demanda do primeiro produto



Fonte: O autor

Figura 20 - Diagrama de fluxo e estoque para a Previsão da Demanda do segundo produto



Fonte: O autor

Estes dois fluxos apresentados são responsáveis pelo tratamento da demanda de produtos advinda do mercado consumidor, ou do setor interno da empresa, para geração de estoques preventivos, dada

instabilidades que o mercado possa vir a apresentar. Para isto, o mesmo conta com a variável de “Ajustes na Previsão de Demanda”, que ajusta a demanda a uma taxa de variação proveniente do meio externo de análise. Deste modo, a variável “Ajuste na Previsão de Demanda” demonstra a diferença no tempo “ t ”, entre o que está sendo enviado de informação para o setor de produção pela variável “Previsão de Demanda”, e o que realmente o mercado deseja, através da “Demanda dos Produtos”.

Portanto, trata-se de um fluxo de informação, que realiza apenas a transferência de informações necessárias para o funcionamento do modelo, enviando para o setor produtivo a quantidade necessária de produtos que deve ser produzida. Já a variável “Tempo para Correção da Previsão de Produtos”, representa o período de tempo “ t ”, no qual, uma possível variação na demanda de mercado seja percebida e analisada pela gerência da organização, ou seja, ela busca demonstrar que a mudança da demanda de mercado não é sentida imediatamente por uma empresa, tornando assim a modelagem mais próxima possível da realidade (STERMAN, 2000).

Já a Figura 21 ilustra as etapas de processamento pelas quais os produtos irão passar, ou seja, trata-se de um recorte contendo as principais variáveis que são responsáveis pelo processamento dos produtos no modelo, até que sejam entregues para armazenamento em estoque ou distribuição.

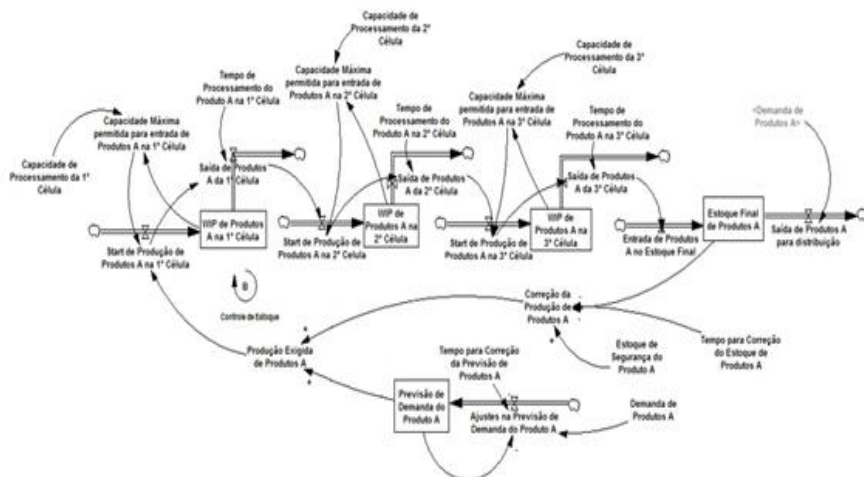
A denominação de “Produto A” e “Produto B” presente no modelo foi inserida pensando-se na possibilidade de produtos diferentes, ou seja, com complexidades diferentes e que pudessem ser produzidos na mesma linha de produção. Entretanto, o “Produto B” pode ser considerado como o “Produto A”, se, por exemplo, deseja-se analisar o comportamento do sistema e sua respectiva produtividade frente a presença de uma demanda inesperada do Produto “A”. Logo, os Produtos “A” e “B” podem ser os mesmos, e a identificação é empregada apenas para distinguir uma nova ordem de produção.

Através da Figura 21, que representa um fluxo material no modelo, ou seja, trata-se das etapas que o processo realiza e que culminarão com a entrega de uma unidade de produto acabado pela variável “Entrada de Produtos no Estoque” para a variável “Estoque Final de Produtos”.

O fluxo tem seu início de processamento com a variável “Produção Exigida de Produtos”, que pode ser vista como a informação que indicará para o sistema a quantidade de produtos necessária a ser fabricada, ou seja, as ordens de produção. Estas ordens de produção

serão atualizadas constantemente com base na quantidade de produtos presentes em estoque, que por sua vez serão influenciadas pelas variáveis “Previsão de Demanda do Produto” e “Correção de Estoque de Produtos”.

Figura 21 - Fluxo de material do modelo proposto



Fonte: O autor

Em se tratando da variável “Tempo para Correção de Estoques de Produtos”, que influencia diretamente a variável de “Correção de Estoques de Produtos”, esta tem como função representar o período de tempo necessário para que as variações no estoque de produtos sejam percebidas dentro do sistema. Ou seja, trata-se do tempo que a gerência de produção necessita para que uma nova decisão tomada possa alterar a programação da produção.

Já a variável “Correção de Estoque de Produtos”, representa numericamente a quantidade de produtos que precisam ser produzidas para que a demanda de mercado exigida seja obtida, ou o estoque desejado seja alcançado ou mantido. Deste modo, têm-se mais um alinhamento do modelo com os pressupostos da dinâmica de sistemas, dado a utilização de *delays* dentro do modelo de simulação para geração de seu comportamento dinâmico (ARIENTE, 2013; BATISTA, 2001; FLORENTÍN, 2001).

A linha de produção representada pelo modelo da Figura 17 é composta por três células de produção, representadas pelas Figuras 22,

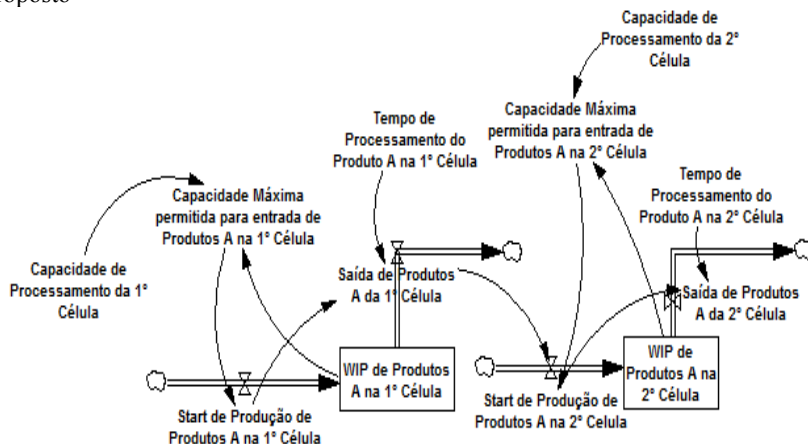
23 e 24, posicionadas de modo sequencial e que são responsáveis pela fabricação/montagem dos produtos. Ou seja, os produtos e seus componentes são fabricados e montados dentro de cada uma das células de produção, e entregues na mesma quantidade que foi produzida pelo seu antecessor.

Figura 22 - Representação gráfica da primeira célula de produção do modelo proposto



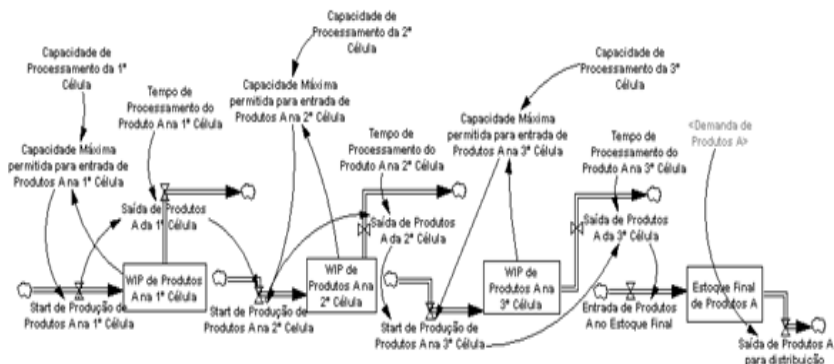
Fonte: O autor

Figura 23 - Representação gráfica da segunda célula de produção do modelo proposto



Fonte: O autor

Figura 24 - Representação de todo o fluxo material do modelo proposto



Fonte: O autor

Através das Figuras 22, 23 e 24, pode-se visualizar quais as variáveis são responsáveis pela entrada e saída de produtos/insumos na linha de produção, sendo que a variável “Start de Produção de Produtos” apresenta a quantidade de insumos/produtos que irá entrar nas células de produção. Enquanto que a variável “Saída de Produtos da Célula” indica a quantidade de produtos que cada uma das células foi capaz de produzir no tempo “t” de acordo com suas capacidades disponíveis.

Nas células de produção, tem-se a presença da variável “Tempo de Processamento do Produto na Célula”, que representa o tempo necessário para a produção do produto dentro de cada uma das células. Na busca por uma representação mais fidedigna da realidade de um sistema produtivo adotou-se a função “DELAY3” disponível dentro do pacote de ferramentas matemáticas do software Vensim® PLE, a qual tem por finalidade a representação de processamento das atividades internas a uma célula de produção formada por um conjunto de ações sequenciais a serem executadas em seu interior.

Deste modo, e de acordo Stermann (2000), uma função de *delay* de terceira ordem, “DELAY3”, dá uma maior veracidade de simulação e proximidade com a realidade fabril. A função de “DELAY3” deve sempre ser empregada quando se busca simular a produção sequencial de insumos dentro de um centro de processamento (célula de produção) que possui diversas etapas de produção acopladas à mesma.

Em se tratando das capacidades produtivas de cada uma das células, pode-se perceber através das Figuras 22, 23 e 24, que as mesmas foram inseridas no modelo através das variáveis “Capacidade

Máxima Permitida para entrada de Produtos nas Células” e “Capacidade de Processamento das Células”. A primeira delas é responsável pela quantidade de insumos que deverá entrar na célula de produção para ser processada, dada a quantidade de insumos que já estejam em processamento em um determinado momento.

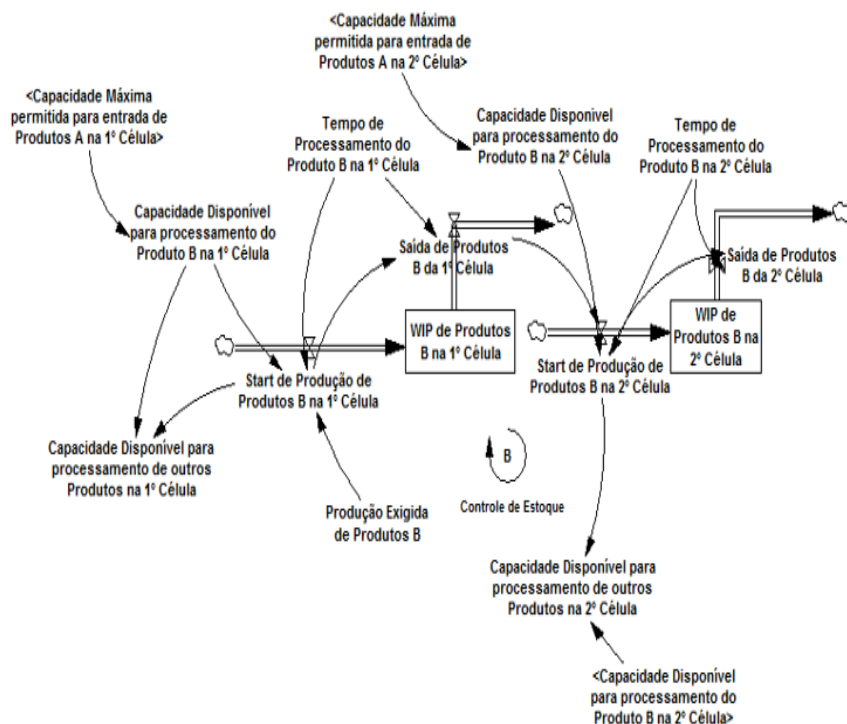
Já a segunda variável, “Capacidade de Processamento das Células”, informa para o sistema a quantidade máxima de produtos que cada uma das células é capaz de processar, sendo que este valor, usualmente em um chão de fábrica, é determinado pela capacidade efetiva de produção das células, equipamentos, dentre outros.

Como já mencionado anteriormente, o segundo bloco do modelo, apresentado na Figura 25 separado por uma linha horizontal, possui características muito similares com o que já foi discutido até então nesta seção. Desta forma, o mesmo possui apenas como lógica distinta, o fato de que a produção de um segundo item só ocorrerá, caso a linha de produção e suas respectivas células possuam capacidades livres.

Estas capacidades livres, são representadas no modelo pela variável “Capacidade Disponível para processamento do Produto B”, conforme é demonstrado na Figura 25, que apresenta parte da estrutura do segundo bloco do modelo e demonstra os fluxos e estoques das duas primeiras células.

Com isto, o valor numérico da variável “Entrada de Produtos B nas Células”, é controlado pela variável “Capacidade Disponível para processamento do Produto B”. Portanto, através das interações entre estas duas variáveis, o modelo pode informar se ainda há ou não a capacidade para processamento de um segundo produto em sua linha de produção.

Figura 25 - Células de produção do segundo bloco do modelo proposto



Fonte: O autor

Por fim, cabe mencionar a variável “Capacidade Disponível para processamento de outros produtos nas Células”, que tem como função informar se, mesmo com a produção dos dois produtos na linha, há a possibilidade para produção de novos produtos, ou, se ainda é possível o aumento de ordens de produção para os dois produtos que se encontram em processo.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a conclusão deste capítulo alcançou-se o objetivo de determinar as relações de causa e efeito entre os elementos da complexidade de produtos e as variáveis da manufatura. A identificação destas relações causais entre as variáveis, permitiu o alcance de mais um objetivo da pesquisa, o desenvolvimento de modelos conceituais para

representação das relações entre os elementos da complexidade e as variáveis do sistema de produção em estudo. Assim como o desenvolvimento de um modelo de simulação dinâmico para a verificação dos efeitos da complexidade de produtos na linha de produção modelada.

De posse do modelo proposto criado, o próximo capítulo apresenta como os incrementos na complexidade dos produtos são analisados e como serão inseridos nas simulações para que os efeitos na produtividade sejam verificados. Para isto, é apresentado no capítulo também o resultado de um conjunto de testes realizados com o modelo proposto, tendo como foco a verificação do mesmo para simulações.

4. VERIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Este capítulo é dividido em duas partes, na qual a primeira apresenta como a complexidade de produtos e seus incrementos são determinados e utilizados nas simulações, e a segunda parte, expõe um conjunto de testes realizados que permitiram a verificação do modelo proposto.

4.1. A COMPLEXIDADE DE PRODUTOS E SEUS INCREMENTOS NO MODELO

De acordo com as informações apresentadas no capítulo dois, tem-se que a complexidade de produtos é formada por quatro elementos principais, o número de componentes, componentes com geometria diferentes, componentes com matéria-prima diferente e as interações entre os componentes do produto.

Deste modo, os incrementos que possam vir a ocorrer na complexidade dos produtos são decorrentes do aumento destes elementos. Em relação a estes incrementos, cabe salientar que esta pesquisa trabalha apenas com uma complexidade aditiva, logo, o aumento no grau da complexidade dos produtos é proveniente do aumento no número de pelo menos um dos elementos que formam esta complexidade.

Deste modo, para verificação dos efeitos do aumento da complexidade na produção adotou-se a existência de um produto base, composto apenas por componentes e interações já utilizados no processo. Pelo fato de se considerar que os aumentos gradativos nos elementos da complexidade dos produtos podem afetar os tempos dos processos e suas operações, logo as demais variáveis do sistema, adotou-se para cada um destes componentes a existência de um tempo padrão associado.

Com isto, além da definição de um tempo padrão para cada um dos componentes que formam a estrutura do produto, definiu-se também em qual célula de produção do modelo proposto o processamento destes componentes ocorrem. E através da adoção destes passos, pode-se então conhecer as alterações em cada uma das células de produção que o aumento da complexidade pode gerar no modelo proposto, e que são a base para as simulações e testes realizados.

Deste modo, reforça-se o fato de que a complexidade do produto e seus incrementos serão sentidos, no modelo proposto, através das alterações nos tempos de processamento que o produto a ser

produzido demandará em cada uma das células produtivas. Para a composição do produto a ser processado, e consequentemente sua complexidade, definiu-se que cada um de seus quatro elementos principais são representados por seis tipos distintos de componentes e interações, conforme é exposto na Quadro 4.

Quadro 4 - Composição da Complexidade do Produto

Elementos formador da Complexidade de Produtos	Composição do Elemento	Local de Processamento no Modelo Proposto	Tempo Padrão para Processamento na Célula (horas)
Número de Componentes	Componente 001	1º Célula de Produção	0,17
	Componente 002	1º Célula de Produção	0,25
	Componente 003	2º Célula de Produção	0,20
	Componente 004	2º Célula de Produção	0,15
	Componente 005	3º Célula de Produção	0,17
	Componente 006	3º Célula de Produção	0,28
Interações	Interação 001	1º Célula de Produção	0,20
	Interação 002	1º Célula de Produção	0,23
	Interação 003	2º Célula de Produção	0,13
	Interação 004	2º Célula de Produção	0,20
	Interação 005	3º Célula de Produção	0,15
	Interação 006	3º Célula de Produção	0,22

(Continua)

(Continuação do Quadro 4)

Elementos formador da Complexidade de Produtos	Composição do Elemento	Local de Processamento no Modelo Proposto	Tempo Padrão para Processamento na Célula (horas)
Componentes com Geometria Diferente	Geometria 001	1º Célula de Produção	0,25
	Geometria 002	1º Célula de Produção	0,33
	Geometria 003	2º Célula de Produção	0,27
	Geometria 004	2º Célula de Produção	0,20
	Geometria 005	3º Célula de Produção	0,18
	Geometria 006	3º Célula de Produção	0,25
Componentes com Matéria-Prima diferente	Matéria-Prima 001	1º Célula de Produção	0,12
	Matéria-Prima 002	1º Célula de Produção	0,17
	Matéria-Prima 003	2º Célula de Produção	0,13
	Matéria-Prima 004	2º Célula de Produção	0,20
	Matéria-Prima 005	3º Célula de Produção	0,25
	Matéria-Prima 006	3º Célula de Produção	0,23

FONTE: O autor.

Através desta possível composição para um produto, e tendo o tempo como base de incremento da complexidade, em decorrência do aumento de um dos elementos que podem compor o produto, conforme apresentado no Quadro 4, a complexidade dos produtos pode ser determinada e analisada, permitindo assim à equipe de desenvolvimento de produtos, bem como a gerência de produção, a identificação dos pontos onde os incrementos aditivos na complexidade do produto pode gerar alterações no processo.

Diante disto, a Tabela 1 apresenta a composição da estrutura que o produto base, ou seja, aquele que sofrerá incrementos em sua

complexidade para que seus efeitos sejam verificados. Este produto foi denominado como base pois nele, é que serão inseridos os incrementos de complexidade para fins de simulação. Com relação a sua estrutura e composição, a mesma foi definida pelo próprio autor, tomando como base lógica a produção em linha de um produto inicialmente composto apenas por componentes que a empresa já esteja habituada a trabalhar e processar, utilizando para isto os seis tipos de interações estipuladas para composição da complexidade do produto.

Deste modo, os incrementos de complexidade que este produto base receberá se dará exclusivamente pelo aumento do número de um dos seus componentes já apresentados no Quadro 4. E para fins de simulação, estes incrementos na complexidade dos produtos serão apresentados tendo como base as mudanças nos tempos padrões que cada uma das células de produção necessitam para fabricação de uma unidade de produto.

Ou seja, um produto mais complexo que o produto base estipulado, para fins de simulação, será aquele que possua em sua estrutura um número de componentes superior ao produto base, seja este aumento dado pela inserção de novos componentes dotados de geometria ou matéria-prima diferentes, ou simplesmente pelo aumento no número de interações e componentes já empregados no produto. Estes incrementos, por sua vez, podem vir a exigir um número maior de operações produtivas a serem realizadas dentro de cada uma das células de produção, alterando assim os seus respectivos tempos padrões para fabricação de uma unidade de produto em cada célula.

Tabela 1 - Estrutura do Produto Base

Composição do Produto	Quantidade (unidades)	Tempo de Processamento na 1ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 2ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 3ª Célula (horas)
Componente 001	02			
Componente 002	05			
Componente 003	07	3,02	3,00	3,00
Componente 005	08			
Componente 006	02			

(Continua)

(Continuação da Tabela 1)

Composição do Produto	Quantidade (unidades)	Tempo de Processamento na 1ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 2ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 3ª Célula (horas)
Interação 001	06			
Interação 002	01			
Interação 003	06			
Interação 004	04	3,02	3,00	3,00
Interação 005	03			
Interação 006	03			

FONTE: O autor.

Pela Tabela 1, percebe-se que o produto base é composto apenas por componentes já conhecidos pelo processo de produção, totalizando 24 no total, necessitando para tanto de 23 interações para estes componentes. Em relação aos tempos padrões das células, percebe-se que há praticamente uma constância no processo, dado que com esta composição do produto base, cada uma das células de produção necessita aproximadamente de três horas para execução das atividades que culminam com a entrega de uma unidade de produto ao estágio seguinte do processo.

Para as simulações que são apresentadas no capítulo cinco, salienta-se que os resultados de produtividade obtido com a simulação inicial do produto base serão empregados como referencial para análise dos efeitos que o incremento na complexidade pode gerar na linha de produção. A primeira simulação realizada com o produto base foi desenvolvida com o intuito de se obter o tempo que a linha necessita para que uma demanda de 100 produtos fosse completamente produzida, sendo que o sistema não apresenta restrições de capacidade para esta produção. Deste modo, os seguintes valores de algumas variáveis foram estipulados como parâmetros de entrada no modelo proposto:

- Demanda do Produto: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 1ª Célula: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 2ª Célula: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 3ª Célula: 100 unidades;
- Estoque de Segurança: 0 unidades.

Com base nestes valores e nas simulações desenvolvidas, percebe-se que o sistema foi capaz de produzir toda a demanda solicitada do produto base em 25 horas de produção, implicando assim em uma produtividade de 04 produtos/hora. Deste modo, este valor de

produtividade será utilizado como base para a análise dos efeitos que os incrementos na complexidade do produto podem gerar na produtividade da linha de produção nas simulações presentes no capítulo cinco.

Em se tratando dos incrementos na complexidade do produto base, provenientes das variações nos elementos que a compõem, representados no modelo proposto pelos aumentos que possam vir a existir nos tempos padrões de cada uma das células de produção. Salienta-se que os tempos padrões expostos na Tabela 1 para o produto base, serão utilizados como referência para a análise dos incrementos na complexidade dos produtos, e que estes incrementos se darão em valores de 10% cada ao longo das simulações do capítulo cinco. Ou seja, o incremento na complexidade do produto é medido tendo como base as alterações nos tempos padrões de cada uma das células de produção.

E através do tempo padrão que cada um destes componentes necessita para sua produção, assim como, o conhecimento do local onde o mesmo é processado dentro da linha de produção, pode-se então conhecer em quais células de produção os incrementos na complexidade do produto geram alterações, permitindo assim um maior gerenciamento dos mesmos dentro do processo. Com base nisto, a Tabela 2 apresenta um exemplo de como se dá um incremento de 10% na complexidade do produto base, que resultou, por sua vez, em alterações nos tempos padrões de cada uma das células produtivas do modelo.

Tabela 2 - Estrutura do Produto 10% mais complexo

Composição do Produto	Quantidade (unidades)	Tempo de Processamento na 1ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 2ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 3ª Célula (horas)
Componente 001	02			
Componente 002	05	3,5	3,00	3,4
Componente 003	07			

(Continua)

(Continuação da Tabela 2)

Composição do Produto	Quantidade (unidades)	Tempo de Processamento na 1ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 2ª Célula (horas)	Tempo de Processamento na 3ª Célula (horas)
Componente 005	08			
Componente 006	02			
Interação 001	06			
Interação 002	01			
Interação 003	06			
Interação 004	04			
Interação 005	06	3,5	3,00	3,4
Interação 006	03			
Geometria 002	01			
Matéria-Prima 001	01			

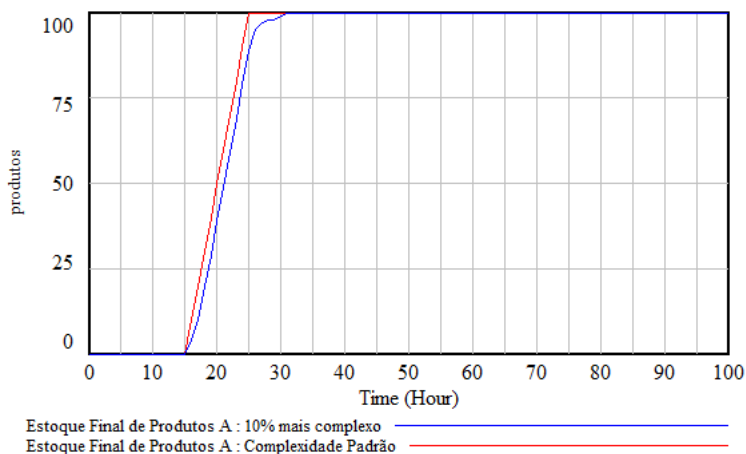
FONTE: O autor.

Através da Tabela 2, e comparando a estrutura deste produto 10% mais complexo com a estrutura do produto base empregado nas simulações iniciais, pode-se perceber que os incrementos na complexidade se deram através do aumento do número de interações, que passou a ser de vinte e seis e não mais vinte e três. Com relação aos componentes empregados no novo produto, tem-se agora que ele conta com um total de vinte e seis componentes, dos quais, dois deles são novos, em decorrência de serem componentes dotados de uma geometria e matéria-prima diferentes.

O incremento dos 10% na complexidade do produto apresentado na Tabela 1, é percebido tendo como base as alterações provocadas nos tempos padrões necessários em cada uma das células de produção. Com isto, pode-se então perceber que a nova estrutura do produto da Tabela 2, alterou os tempos padrões da primeira e terceira célula do modelo, sendo que na primeira este aumento representou aproximadamente 5,5% do tempo padrão total, enquanto que na terceira este aumento representou 4,5% do total. Deste modo, cabe salientar que diversas combinações possíveis dos componentes que compõem o produto base podem ser geradas e que culminem com o incremento de 10% na complexidade, empregando para tanto a composição possível que o produto pode ter e já apresentada na Quadro 4. Com relação ao comportamento que o sistema de produção apresenta frente esta nova

complexidade, a Figura 26 apresenta o resultado obtido no estoque final de produtos do modelo.

Figura 26 – Estoque Final do Produto 10% mais complexo



FONTE: O autor.

Em uma análise da Figura 26, e comparando o resultado obtido para os dois níveis de complexidade empregado no produto, nota-se que o produto 10% mais complexo fez com que a linha de produção conseguisse produzir em 25 horas de operação apenas 89% da demanda total de 100 produtos nas mesmas, ou seja, 11% a menos na produtividade do sistema, se comparado com a produção do produto base.

Com relação a seu *lead time* produtivo, pode-se perceber também que a linha só conseguiu concluir toda a demanda solicitada em aproximadamente 32 horas de operação, ou seja, necessitou de sete horas a mais em operação para que toda a demanda fosse concluída. O que por sua vez, pode contribuir para o aumento dos custos operacionais do sistema produtivo, bem como a necessidade de possíveis estoques intermediários e de segurança para que as demandas de mercado não sejam prejudicadas.

Deste modo, um conjunto maior de simulações e incrementos na complexidade do produto base serão apresentados no capítulo cinco deste trabalho, mas antes destas simulações, salienta-se que o modelo proposto passou por um conjunto de testes e simulações, que

priorizaram a verificação de sua estrutura desenvolvida. Com base nisto, a seção a seguir apresenta os principais resultados obtidos com os testes de verificação realizados.

4.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO

Os testes de verificação que podem ser aplicados em modelos dinâmicos, têm como objetivo verificar se um modelo de simulação é capaz de apresentar resultados confiáveis, e que permitam demonstrar o verdadeiro comportamento esperado pelas variáveis envolvidas.

Neste sentido, um dos testes que podem ser realizados diz respeito a verificação da estrutura do modelo, o qual reside no fato de analisar a atuação sistêmica que os ciclos de realimentação exercem no modelo, ou seja, se eles são realmente capazes de controlar o processo, buscando sempre convergir para o comportamento esperado. Deste modo, e com base nos testes de comportamento apresentados no decorrer desta seção, pode-se perceber que o modelo proposto apresentou comportamento condizente com o esperado.

Outro teste realizado com o modelo foi o de verificação dos parâmetros, também de cunho qualitativo, ele tem como objetivo principal verificar se os parâmetros balizados para estruturação do modelo proposto se adéquam aos padrões de referência adotados. Neste caso, tendo como base os resultados que o modelo apresentou através dos testes de comportamento que seguem, percebe-se que seus parâmetros adotados estão de acordo com os padrões de referência adotados.

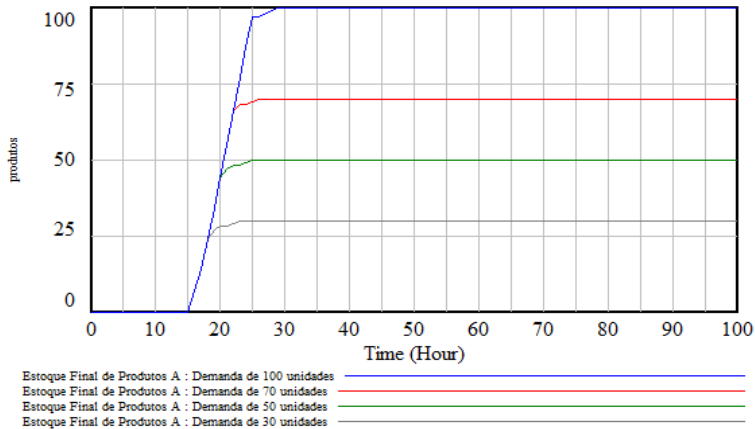
Em reforço a esta afirmativa, pode-se mencionar o fato do modelo proposto ter sido criado seguindo todas as etapas de construção descritas nos modelos genéricos para sistemas de produção de bens apresentados por Sterman (2000). Como também fez uso dos passos empregados na verificação de modelos dinâmicos apresentados nos trabalhos de alguns autores (BATISTA, 2001; GONÇALVES, 2009; SANTOS, 2006; FLORENTÍN, 2001; ARIENTE, 2013), os quais comprovaram ao final de suas verificações, resultados de comportamento condizentes com os objetivos planejados para as pesquisas.

O terceiro teste realizado é o de verificação do comportamento, de cunho quantitativo, consistem em um processo de experimentação controlada na qual busca-se analisar se os desvios apresentados no comportamento das variáveis analisadas correspondem às induções inseridas no modelo (STERMAN, 2000; ARIENTE, 2013). Portanto,

para realização dos mesmos, alguns parâmetros de determinadas variáveis são pré-estabelecidos, e de posse da realização das simulações, busca-se analisar se os resultados obtidos são condizentes com o esperado.

Para a realização do primeiro teste de comportamento, foi inserido no modelo a necessidade de produção de 4 demandas específicas para um produto genérico qualquer, 30, 50, 70 e 100 unidades, considerando ainda que o estoque de segurança do sistema é de zero unidades. Deste modo, a Figura 27 apresenta em um só gráfico, o comportamento obtido pela variável que representa o “Estoque Final de Produtos” do modelo proposto.

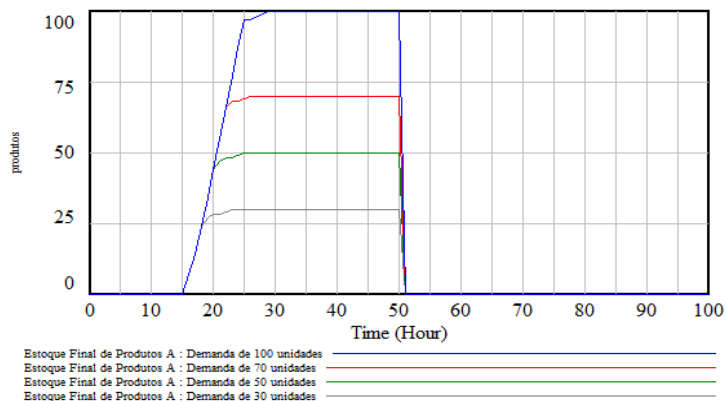
Figura 27- Resultado de Verificação 01



FONTE: O autor.

Através dos resultados obtidos na Figura 27, pode-se perceber pela curva do “Estoque Final de Produtos”, que a quantidade de produtos demandada foi produzida completamente. Com base neste primeiro teste, inseriu-se no modelo a necessidade de saída de produtos do sistema de produção na mesma quantidade de suas respectivas demandas, sendo que todas as saídas programadas devem ocorrer 50 horas após o início da simulação.

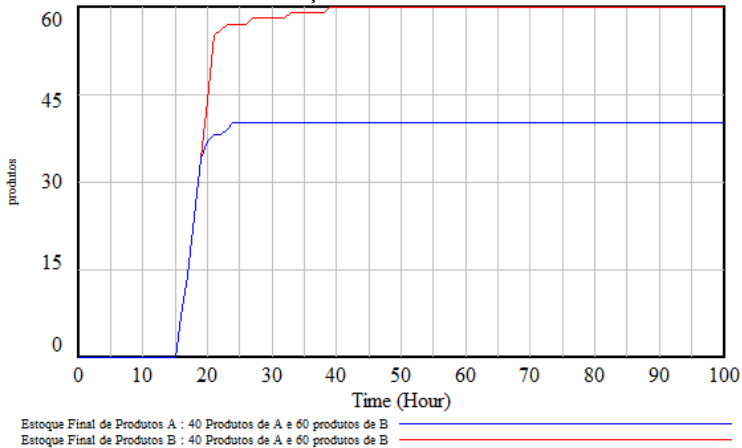
Figura 28 - Resultado de Verificação 02



FONTE: O autor.

Com base no gráfico exposto na Figura 28, pode-se notar que o sistema compreende o comando de saída de produtos e retira do sistema toda a demanda produzida para cada uma das simulações realizadas no tempo pré-determinado. Conforme já exposto no capítulo três deste trabalho, o modelo de simulação dinâmico proposto representa uma linha de produção, sendo que a mesma é capaz de produzir dois tipos diferentes de produtos. Com isto, adota-se para os dois produtos a denominação já apresentada no capítulo de construção do modelo, ou seja, Produto “A” e “B”, sendo que cada um deles possui estoque de segurança zerado e uma demanda de 40 e 60 unidades, respectivamente. Realiza-se então um teste de verificação para a fabricação destes dois produtos, sendo que a Figura 29 representa o comportamento obtido com este teste.

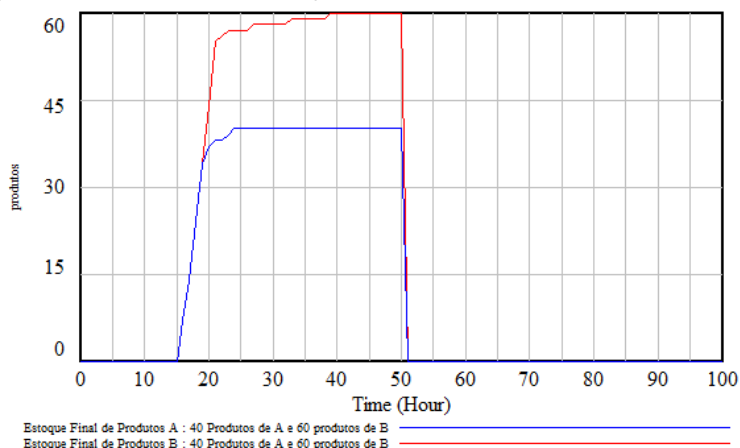
Figura 29 – Resultado de Verificação 03



FONTE: O autor.

Com o resultado exposto na Figura 29, observa-se que o sistema compreende a necessidade de produção de dois produtos distintos, e com isto, faz com que o processo produza a demanda solicitada pelos dois produtos. Para o último comportamento do modelo, considerou-se a presença dos dois produtos apresentados nos parágrafos anteriores, com as mesmas demandas solicitadas para ambos, ou seja, a necessidade de produção de 40 unidades para o Produto “A” e 60 unidades para o Produto “B”. Entretanto, considera-se agora a saída programada de toda a demanda dos produtos “A” e “B” para 50 horas após o início da simulação. O gráfico da Figura 30 apresenta o comportamento obtido pelo estoque final dos produtos para este último teste de comportamento.

Figura 30 - Resultado de Verificação 04

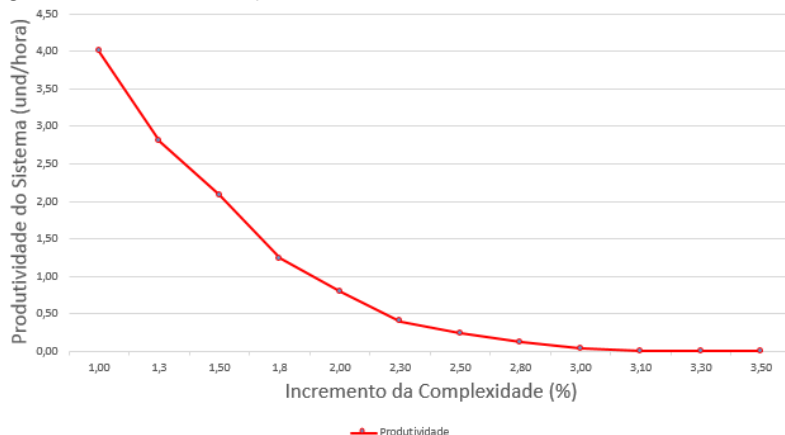


FONTE: O autor.

Com base no resultado do comportamento dos estoques finais para os dois produtos, pode-se também perceber que toda a demanda dos dois produtos foi produzida. E que nas 50 primeiras horas de simulação, toda a demanda solicitada para os dois produtos foi retirada do sistema, não permanecendo assim em estoque. Um último teste de verificação aplicado ao modelo proposto, o de condições extremas, que consiste em ajustar o modelo com parâmetros muito próximos aos limites máximos suportados pelo sistema. Uma forma de se realizar este teste, reside no fato de incrementar a complexidade do produto de tal modo que se consiga visualizar o ponto onde o sistema de produção é capaz de produzir sua produção mínima, ou seja, uma unidade de produto acabado.

Para este tipo de teste, tendo como parâmetro inicial a complexidade apresentada pelo produto base, e estabelecida para fins de simulação, procedeu-se então com incrementos sucessivos na complexidade deste produto, buscando assim identificar o ponto onde a produtividade da linha fosse muito próxima de zero. Deste modo, com base em diversas simulações, a Figura 31 apresenta o comportamento da produtividade da linha em condições extremas.

Figura 31- Teste de Condições Extremas



FONTE: O autor

Como se pode notar pela **Figura 654**, o sistema torna-se incapaz de produzir uma unidade de produto acabado quando a complexidade do produto é cerca de 350% mais alta, quando comparada com a do produto base, levando assim sua produtividade a zero. Logo, a linha de produção modelada apresenta o triplo da complexidade para o produto como o ponto onde sua produção é mínima e nenhuma unidade pode ser produzida. Com isto, percebe-se que o modelo apresentou resultados satisfatórios para os quatro tipos de testes realizados, principalmente pelos resultados positivos obtidos com a aplicação dos testes de comportamento.

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a apresentação deste capítulo, buscou-se demonstrar como os incrementos na complexidade dos produtos são realizados, tendo como base a apresentação do produto base, e que será usado como referência para a análise do comportamento da produtividade da linha de produção. Ainda neste capítulo, quatro tipos de testes de verificação foram realizados com o modelo proposto de simulação dinâmica, tendo como objetivo principal a verificação de sua estrutura. Com a realização destes testes e dos resultados obtidos, e considerando que esta pesquisa é desenvolvida no contexto acadêmico, pode-se, portanto, considerar que o modelo proposto é apto para este estudo em específico.

Deste modo, o capítulo cinco irá apresentar os principais resultados obtidos através de um conjunto exaustivo de simulações desenvolvidas com o modelo proposto, tendo como objetivo a verificação dos efeitos que os incrementos e variações na complexidade dos produtos pode gerar na produtividade da manufatura.

5. EFEITOS DA COMPLEXIDADE NA PRODUTIVIDADE

Neste capítulo são apresentadas um conjunto de simulações com o intuito de observar o comportamento da produtividade em função do aumento da complexidade do produto. Também é apresentada uma série de simulações onde a linha de produção possui restrições de capacidade. Todos os incrementos na complexidade são aditivos usando como referência de incremento o produto base determinado para fins das simulações realizadas nesta pesquisa, conforme apresentado no capítulo quatro.

Nas primeiras simulações verificou-se os efeitos que a complexidade pode gerar na produtividade do sistema, sem levar em consideração a presença de possíveis restrições de capacidade. Nas demais simulações, primeiro foi determinada a capacidade mínima de produção, aquela na qual toda a demanda solicitada para o produto base é atendida. Desta forma, qualquer redução da capacidade nas células representava um gargalo no sistema. A seguir, um conjunto de simulações foi realizado para avaliar os efeitos de incrementos na complexidade na presença destes gargalos.

5.1. PRIMEIRO GRUPO DE ANÁLISE

As simulações realizadas neste grupo analisam os efeitos que incrementos na complexidade podem provocar na produtividade, sem levar em consideração possíveis restrições de capacidade nas células produtivas. Para tanto, a partir dos resultados de comportamento obtidos com o produto denominado de base, novas simulações foram desenvolvidas, elevando sequencialmente a complexidade deste produto.

Com base neste produto, as simulações que são apresentadas adiante, foram desenvolvidas aplicando-se incrementos sucessivos de 10% na complexidade total do produto base, até que o produto apresentasse o dobro de sua complexidade. Entretanto, estes incrementos sucessivos foram aplicados de modos distintos, de tal forma que cada um dos incrementos realizados nos produtos, em decorrência dos incrementos em seu número de componentes possíveis e interações, foram capazes de gerar alterações distintas nos tempos padrões de cada uma das células produtivas.

Uma das primeiras alterações proporcionadas pela complexidade gerou alterações, de certo modo similares, nos tempos padrões de todas as células, e em uma segunda alteração, percebeu-se

que os incrementos da complexidade geraram alterações distintas nos tempos de todas as células. Em sequência, três novos modos para incrementos da complexidade foram aplicados, sendo que nestes, os incrementos sucessivos de 10% geraram alterações apenas nos tempos padrões da primeira célula de produção, mantendo os processos das demais células sem alterações. Logo após esta simulação, repetiu-se os mesmos incrementos, sendo que agora o aumento na complexidade afetou apenas o tempo padrão da segunda célula, e posteriormente apenas os da terceira.

Cabe salientar que para o desenvolvimento de todas as simulações mencionadas no parágrafo anterior, os seguintes parâmetros de entrada para algumas variáveis do modelo proposto foram adotados:

- Demanda do Produto: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 1ª Célula: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 2ª Célula: 100 unidades;
- Capacidade de Processamento da 3ª Célula: 100 unidades;
- Estoque de Segurança: 0 unidades.

De posse destas considerações, e para a realização das simulações com o produto base que geraram alterações similares nos tempos padrões das células de produção, a Tabela 3 apresenta a composição que o produto teve para que os incrementos em sua complexidade pudessem ser sentidos, bem como alguns dos efeitos na linha de produção modelada que contribuíram para o comportamento da produtividade do processo.

Tabela 3 - Composição da complexidade para alterações similares na linha de produção

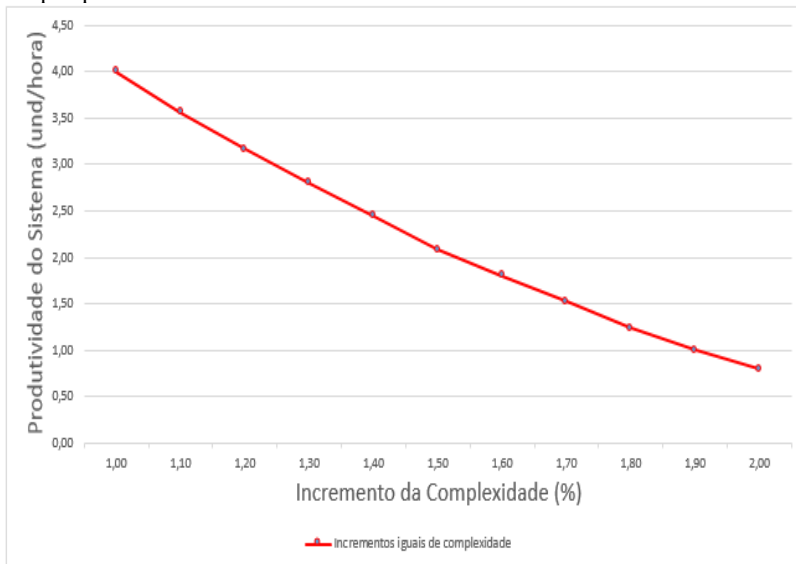
Incrementos na Complexidade do Produto	Componentes conhecidos (und)	Interações (und)	Geometria Distinta (und)	Matéria-Prima Distinta (und)	Work in Process (und)	Lead Time Produtivo (horas)	Produtos Acabados (und)
Produto Base	24	23	00	00	0	25	100
10%	25	25	00	00	11	32	89
20%	29	26	00	00	21	36	79
30%	29	27	2	1	30	37	70
40%	29	29	4	2	39	40	61
50%	29	32	6	4	48	43	52
6%	29	35	7	4	55	44	45
70%	30	36	7	5	62	47	38
80%	30	37	8	5	69	49	31
90%	30	41	9	6	75	51	25
100%	30	45	10	6	80	54	20

FONTE: O autor.

Através dos resultados apresentados na Tabela 3, pode-se perceber que incremento gradativo de complexidade no produto proporcionou efeitos negativos na linha de produção. Dentre estes efeitos, observa-se, por exemplo, que a quantidade de produtos em processo (*Work in Process*) do produto dotado da maior complexidade, no momento em que toda a demanda do produto base foi produzida, ou seja, em vinte e cinco horas de simulação, é de aproximadamente 80 unidades, implicando assim em um retardo na conclusão de toda a demanda solicitada. Deste modo, este retardo dentro do sistema de produção, faz com o *lead time* produtivo da linha aumente, sendo necessário para tanto cerca de cinquenta e quatro horas de simulação para que toda a demanda seja produzida.

Estes efeitos gerados dentro do processo produtivo, contribuíram de modo direto para que os índices de produtividade do sistema sofressem quedas ao longo do tempo de simulação. Com isto, a Figura 32 apresenta um gráfico contendo o comportamento da produtividade do sistema após a realização de um conjunto exaustivo de simulações.

Figura 32 - Comportamento da produtividade com alterações análogas nos tempos padrões das células



FONTE: O autor.

Através da Figura 32, percebe-se que a produtividade do sistema referente à produção do produto base estipulado para a realização das simulações é de 4 unidades/hora, logo, com esta produtividade inicial, o sistema é capaz de produzir a demanda solicitada em 25 (vinte e cinco) horas de simulação. Entretanto, ao se analisar produtividade do sistema quando os primeiros 10% a mais de complexidade é inserida, nota-se que a produtividade do mesmo cai para 3,56 unidades/horas, representando assim uma perda de 11% na produtividade da linha. Em uma análise da curva da produtividade apresentada com base nos demais incrementos, observa-se que o dobro de complexidade no produto foi capaz de gerar uma perda média ponderada de 53,1% na produtividade do processo, fazendo assim com que a linha de produção não consiga produzir a demanda solicitada.

Diante dos resultados obtidos, e levando-se em consideração agora apenas o incremento de 10% na complexidade no produto que geraram alterações distintas nos tempos padrões de cada uma das células. Buscou-se então descobrir se a forma como a complexidade do produto altera os processos das células de produção e consequentemente seus tempos padrões, são capazes de gerar, de algum modo, algum comportamento diferente na produtividade, tendo como base de comparação os resultados já obtidos com as primeiras simulações do produto base. E a depender destes novos resultados, pode-se então considerar que os efeitos causados na produtividade do sistema não são provenientes das alterações que a complexidade pode gerar em cada uma das células isoladas, mas sim, no sistema de produção como um todo. Deste modo, a Figura 33 demonstra as oscilações na produtividade quando apenas 10% a mais de complexidade do produto é inserida no processo de diversas maneiras diferentes.

Tabela 4 - Composição da complexidade para alterações distintas na linha de produção

Incrementos na Complexidade do Produto	Componentes conhecidos (und)	Interações (und)	Geometria Distinta (und)	Matéria-Prima Distinta (und)	Work in Process (und)	Lead Time Produtivo (horas)	Produtos Acabados (und)
Produto Base	24	23	00	00	0	25	100
10%	27	25	1	00	10	33	90
20%	28	27	1	1	21	37	79
30%	31	29	1	1	30	39	70
40%	31	31	3	2	39	40	61
50%	33	33	3	2	47	44	53
6%	34	35	3	3	56	46	44
70%	34	36	4	4	63	48	37
80%	35	38	4	4	70	50	30
90%	35	41	6	5	75	54	25
100%	36	43	6	7	80	55	20

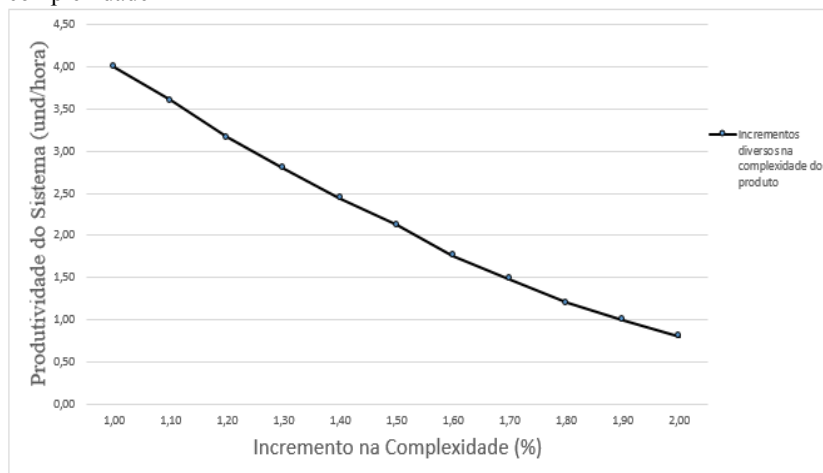
FONTE: O autor.

Da Tabela 4 apresentada, percebe-se que a composição do produto base sofreu alterações diversas, como por exemplo, o produto 100% mais complexo passa a ter agora praticamente o dobro de interações necessárias. E isto se dá em decorrência do aumento do número de seus componentes usuais, bem como a inserção de novos componentes dotados de uma geometria e matéria-prima diferentes.

Ainda com base nos resultados obtidos e apresentados na Tabela 4, observa-se que o incremento na complexidade do produto base que gerou alterações distintas nos tempos padrões das células e que contribuíram para a queda da produtividade da linha. Uma destas contribuições reside no aumento do *lead time* produtivo do processo, necessitando com o dobro da complexidade do produto, de aproximadamente cinquenta e cinco horas para que toda a demanda fosse produzida. O que por sua vez, acaba implicando diretamente em outras variáveis do sistema, como no número de produtos em processo, e consequentemente na disponibilidade de capacidade das células.

Para uma melhor compreensão da perda produtiva na linha, a Figura 34 apresenta o comportamento obtido pela produtividade do sistema para esta simulação, do qual, pode-se perceber que o dobro de complexidade fez com que a produtividade do sistema sofresse uma redução na produção de 4,00 para 0,80 unidades/hora, implicando assim em uma perda de 53,3% de produtividade.

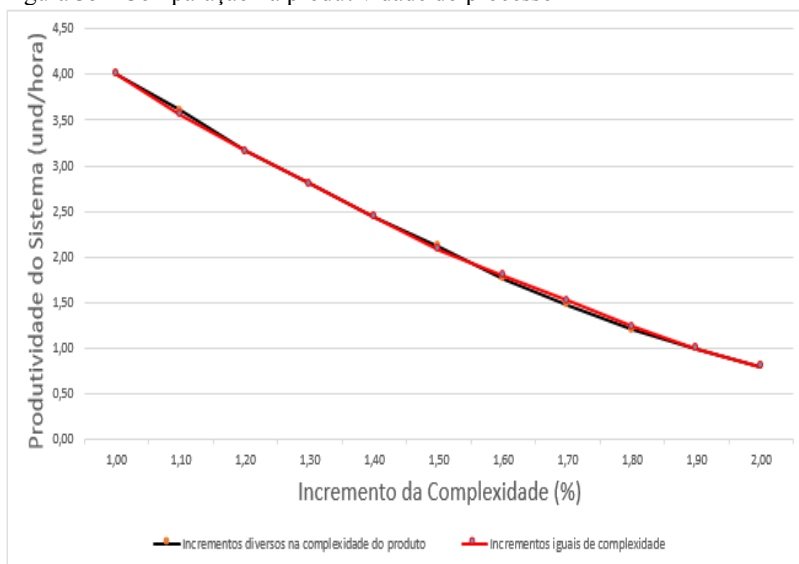
Figura 34 - Comportamento da Produtividade com incrementos distintos de complexidade



FONTE: O autor.

Para uma comparação direta, a demonstração de que a produtividade do sistema é afetada diretamente pelo incremento na complexidade, a Figura 35 demonstra juntamente o comportamento da produtividade obtido com as duas simulações já realizadas e representadas pelas Figuras 33 e 34.

Figura 35 - Comparação na produtividade do processo



FONTE: O autor.

Com base nesta Figura 35, percebe-se que as quedas na produtividade das duas simulações apresentam valores muito próximos, 53,1% para as alterações similares nos tempos padrões das células, e de 53,3% para alterações distintas nestes tempos. E que estas diferenças de resultados, assim como na curva que representa a queda de produtividade do sistema, são provenientes das pequenas oscilações que podem ocorrer, como já demonstrado anteriormente.

Com base nos resultados obtidos até então, de onde sabe-se que a produtividade do sistema é afetada principalmente pelo incremento de complexidade que se aplica no produto base, e não pela distribuição que esta apresenta dentro do processo. Um conjunto exaustivo de novas simulações foi realizado, visando mais uma vez, analisar o

comportamento que a produtividade do processo apresenta mediante os incrementos sucessivos de 10% de complexidade no produto base.

Entretanto, estes incrementos na complexidade agora, alteraram os tempos padrões de apenas uma das células de produção, mantendo os processos das demais células constantes, como já mencionado nos parágrafos anteriores, e não alterando assim seus tempos padrões de processamento. Ou seja, se um produto apresentar 30% a mais de complexidade, ela gerará alterações nos processos, por exemplo, apenas na primeira célula de produção, enquanto que as demais permanecerão com seus processos inalterados. Deste modo, a primeira simulação, realizou incrementos na complexidade que afetassem apenas a primeira célula de produção, partindo de um incremento inicial de 10% até um incremento de 100%, sendo que esta ação foi repetida diversas vezes para cada uma das células de produção.

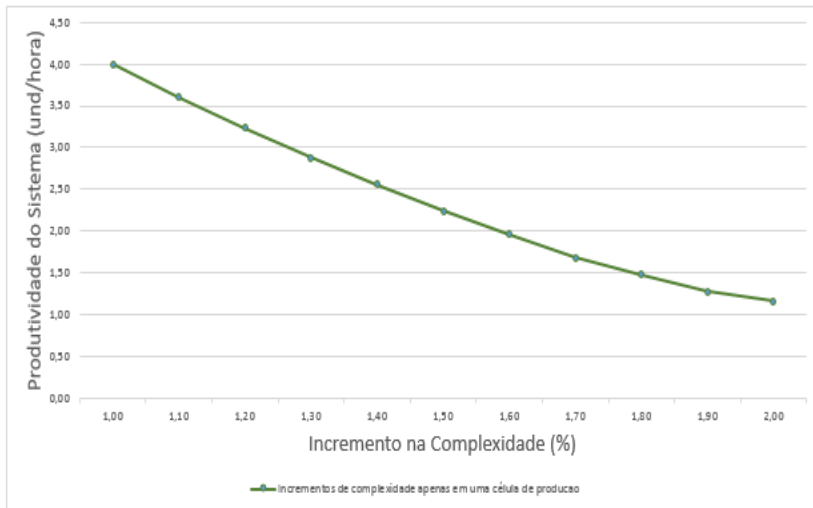
Com isto, a Figura 36 demonstra a curva da queda que a produtividade sofreu devido ao aumento da complexidade apenas em uma das células de produção. Salienta-se que simulações foram realizadas com alterações na complexidade apenas na primeira célula, em seguida na segunda e por fim na terceira. Todavia, como o comportamento obtido para os três grupos de simulações realizados foi bastante similar, decidiu-se a apresentação apenas do gráfico da Figura 36, o qual apresenta o comportamento da produtividade da linha de produção para os três tipos de incrementos na complexidade do produto. Em complemento a isto, a Tabela 5 apresenta as diversas composições que o produto base teve para que sua complexidade fosse elevada, contribuindo assim para alterações apenas nos tempos de processamento da primeira célula de produção.

Tabela 5 - Composição da complexidade para alterações em apenas uma das células na linha de produção

Incrementos na Complexidade do Produto	Componentes conhecidos (und)	Interações (und)	Geometria Distinta (und)	Matéria-Prima Distinta (und)	Work in Process (und)	Lead Time Produtivo (horas)	Produtos Acabados (und)
Produto Base	24	23	-	-	0	25	0
10%	25	25	1	-	10	31	90
20%	26	28	1	1	19	34	81
30%	26	31	2	2	28	37	72
40%	29	33	2	2	36	40	64
50%	29	35	3	3	44	44	56
6%	29	37	5	3	51	47	49
70%	30	40	5	4	58	50	42
80%	30	43	5	6	63	53	37
90%	30	45	7	6	68	57	32
100%	31	48	8	7	71	60	29

FONTE: O autor.

Figura 36 - Comportamento da Produtividade com incrementos únicos em uma célula



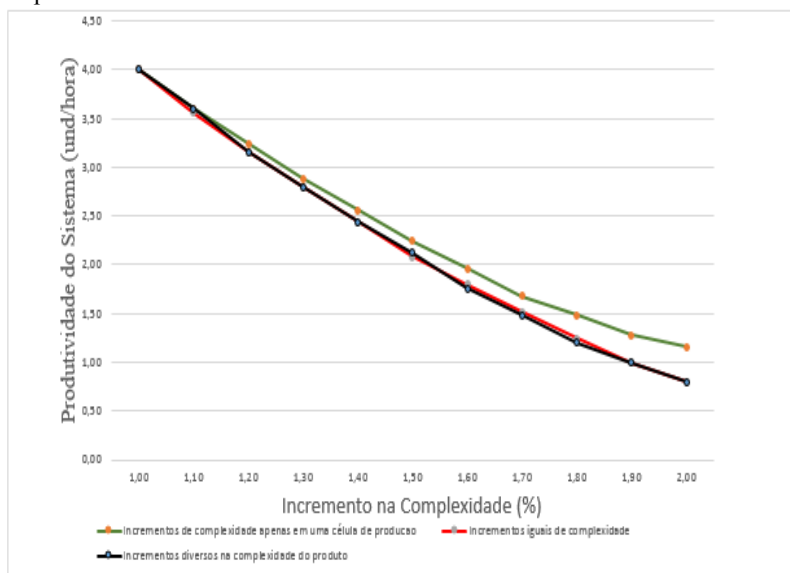
FONTE: O autor.

Para estes três tipos de simulações realizadas, percebe-se que a perda de produtividade total proveniente da produção de um produto 100% mais complexo foi de 48,5%, passando então a produzir agora 1,16 produtos/hora e não mais 4,00 unidades/hora como era com a produção do produto com complexidade padrão.

Os resultados com relação ao comportamento da produtividade apresentados no parágrafo anterior são justificados também pelos resultados expostos na Tabela 5, através dela pode-se perceber o ganho produtivo na linha deve-se ao fato desta ser capaz de produzir uma quantidade maior de produtos acabados em vinte e cinco horas maior, frente aos resultados obtidos com as duas primeiras simulações. Deste modo, neste período a linha foi capaz de entregar 29% da demanda total exigida para o produto, implicando assim em um aumento de 45% a mais de produtos acabados produzidos quando comparado com as duas primeiras simulações. Entretanto, mesmo com a capacidade de uma maior produção no tempo em análise, nota-se que o sistema sofreu quedas expressivas em sua produtividade, como já exposto na Figura 36, levando com isto a não produção de toda a demanda, em decorrência dos efeitos que o aumento da complexidade gerou.

Em um comparativo com a queda de produtividade obtida com as primeiras simulações, onde os incrementos na complexidade geraram alterações nos tempos padrões de todas as células de produção e não somente em uma delas, a Figura 37 foi estruturada. Ela apresenta em um só gráfico, a curva de produtividade obtida com todas as simulações realizadas neste grupo, ou seja, os comportamentos expostos nas Figuras 32, 34 e 36.

Figura 37 – Comportamentos obtidos com todas as variações na complexidade do produto



FONTE: O autor.

Por meio dos resultados plotados no gráfico da Figura 37, constata-se que a queda de produtividade é maior quando os incrementos na complexidade são capazes de gerar alterações nos tempos de todas as células, e não somente em uma delas. Dado que, para uma alteração nas três células, tem-se que a perda produtiva foi em média de 53,2%, enquanto alterações pontuais em apenas uma delas foi de 48,5%, representando assim um ganho médio na produtividade de 4,7%.

Estes resultados distintos de produtividade ocorrem primeiramente pelo fato da utilização de capacidade das células de

produção, dado que, para as primeiras simulações, em média cerca de 47% da capacidade total das células foi utilizada, enquanto que, na última simulação, onde a complexidade alterou o processo da linha apenas em uma só célula de produção, percebe-se que apenas 29% da capacidade máxima foi empregada para a produção. Com isto, quando o aumento da complexidade altera o processo de produção de apenas uma célula, gera um atraso apenas nesta, enquanto que as demais irão dar sequência à produção de modo mais rápido que a célula que sofreu alterações, justificando assim a menor capacidade utilizada, pois as células que não sofreram alterações em seus processos, irão ficar ociosas um maior tempo, em decorrência da espera dos produtos que estão sendo processados nas células afetadas. Entretanto, quando o aumento na complexidade do produto altera o processo das três células, um atraso proporcional é sentido em todas elas, deixando com isto todo o processo mais lento, implicando assim em uma menor taxa de produção dos produtos por células, que por sua vez, irá acarretar uma queda maior na produtividade total do sistema.

5.2. SEGUNDO GRUPO DE ANÁLISE

Com a demonstração de que os incrementos na complexidade do produto afetam a produtividade do sistema, sem a presença de possíveis restrições de capacidade, as simulações que são apresentadas neste novo grupo de simulações, foram desenvolvidas com o objetivo de analisar os efeitos na produtividade do processo, levando em consideração, além dos incrementos de complexidade, a presença de restrições na capacidade de produção das células do modelo proposto.

Em relação aos valores adotados para os parâmetros de entrada do modelo proposto, salienta-se que os mesmos valores foram empregados para a demanda solicitada do produto, mantendo-a em 100 unidades, já o estoque de segurança também foi mantido em zero unidades. Porém, as variáveis relacionadas com a capacidade de processamento de cada uma das células foram alteradas para valores mínimos, os quais permitissem a produção de toda a demanda solicitada, ou seja, a produção de 100 unidades de produtos.

Para tanto, um conjunto exaustivo de simulações foi desenvolvido até que a capacidade mínima que cada célula deve dispor fosse determinada, objetivando assim a produção de toda a demanda solicitada no tempo de 25 horas, conforme foi apresentado na seção anterior para o produto adotado como base para as simulações. Com isto, obteve-se então que a capacidade mínima capaz de produzir toda a

demanda, sem perda na produtividade do produto padrão foi estabelecida em 40 unidades de produtos em processamento por célula de produção.

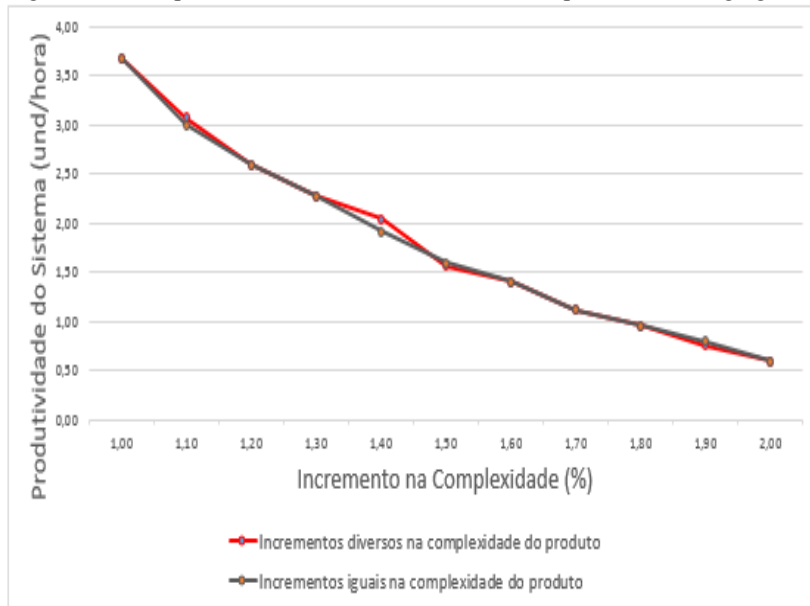
Portanto, se a capacidade de produção de qualquer uma das células for abaixo deste valor apresentado no parágrafo anterior, fará com que o sistema não seja capaz de manter sua produção com o mesmo índice de produtividade. Como por exemplo, ao se arbitrar a capacidade de processamento de uma das células em um valor de 39 unidades, comprovou-se através das simulações que o sistema apresenta uma produtividade de 3,92 unidades/hora, logo, uma redução de 2% na produtividade.

Com base nisto e para o desenvolvimento das simulações que são apresentadas a seguir, adotou-se uma redução de 10% na capacidade das células, arbitrada de modo distinto, e aplicando os mesmos incrementos na complexidade do produto que foram utilizados nas simulações do grupo anterior, justificando com isto o fato desta seção não apresentar as tabelas de composição do produto com suas alterações, dado que as mesmas já foram apresentadas na seção anterior.

Deste modo, para as primeiras simulações realizadas, aplicou-se a redução de capacidade mencionada anteriormente de 10% apenas na primeira célula, e procedeu-se os incrementos na complexidade. Em sequência, estes mesmos procedimentos, ou seja, redução de capacidade de uma célula em 10% e os incrementos na complexidade do produto foram realizados com a segunda e terceira célula de produção.

Com a primeira célula de produção tendo uma capacidade 10% menor que as demais, dois tipos de incrementos na complexidade do produto foram inseridos. No primeiro deles, estes incrementos geraram alterações similares nos processos de todas as células, logo alterações em seus tempos padrões, e no segundo, geraram alterações distintas, permitindo assim a estruturação do gráfico presente na Figura 38.

Figura 38 - Comportamento da Produtividade, sendo a primeira célula gargalo.



FONTE: O autor.

Para as simulações onde os incrementos afetaram igualmente todas as células, nota-se que houve uma queda de 59,6% na produtividade do processo, já para as alterações distintas obteve-se uma queda na produtividade de 59,4%. Em um comparativo com as simulações iniciais presentes no primeiro grupo de simulação, percebe-se que para estes dois tipos de incrementos na complexidade, e sem levar em consideração a presença de restrições no sistema, tem-se que os valores apresentados na queda da produtividade foram de 53,1% e 53,3%, respectivamente. Deste modo, em uma análise comparativa de resultados, pode-se perceber que a presença do gargalo na primeira célula de produção contribuiu com uma redução média na produtividade do sistema em torno de 6,3%.

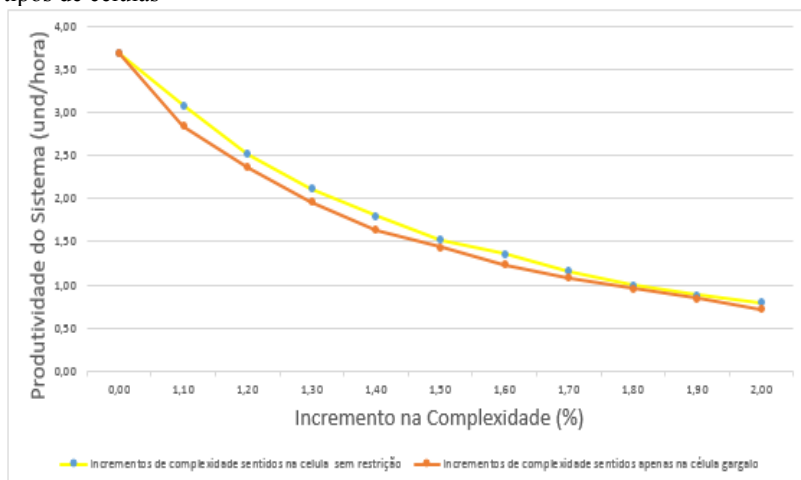
Esta queda na produtividade apresentada no parágrafo anterior é decorrente de um conjunto de fatores associados à linha de produção, um deles, principalmente, reside na redução de capacidade das células, que por sua vez, reduziu inicialmente a possibilidade da linha de produzir toda a demanda de cem para noventa e duas unidades. Entretanto, os incrementos na complexidade do produto impactaram de

modo direto no processo e em sua produtividade, dado que, com uma complexidade de 100% em cima do produto base, tem-se que o sistema foi capaz de produzir, em aproximadamente 50 horas de simulação, apenas 62 unidades de produto acabado. Ou seja, a presença de uma alta complexidade e do limitante de capacidade na linha implicou em uma queda em torno de 32,6% na produção total da linha, que por sua vez contribui assim para a queda apresentada pela produtividade da linha.

Através destes resultados, buscou-se agora perceber qual o efeito na produtividade, quando o incremento na complexidade provoca alterações apenas na célula de produção que apresenta uma redução de 10% na capacidade, ou seja, o gargalo da linha modelada. Em seguida, procurou-se analisar também o comportamento do sistema quando estes mesmos incrementos geram alterações apenas nos processos das células que não possuem restrições produtivas. De posse disto, mais de duzentas simulações arbitrando e alterando o gargalo de produção, bem como os efeitos que os incrementos de complexidade podem gerar nos tempos de uma só célula foram feitas, buscando assim, compreender o comportamento geral que a produtividade apresenta.

Com isto, a Figura 39 apresenta uma concatenação dos principais resultados obtidos em um só gráfico, para o comportamento que a produtividade do sistema apresentou decorrente deste conjunto de simulações realizadas.

Figura 39 – Produtividade com incrementos de complexidade sentidos nos dois tipos de células



FONTE: O autor.

A partir deste novo conjunto de resultados, constata-se que a presença de uma restrição juntamente com incrementos em uma só célula de produção, gera no processo uma queda na produtividade de 62,2%, ou seja, uma perda de mais da metade da capacidade do sistema. Em uma análise dos resultados destas simulações, tem-se que quando o incremento de complexidade altera o processo da célula que já apresenta alguma restrição de capacidade, cerca de 52,1% a menos de produtos acabados deixam de ser produzidos, em decorrência da falta de capacidade disponível para esta produção. Esta produção incompleta e consequente perda produtiva já apresentada, também é proveniente do emprego de toda a capacidade disponível pela linha, dado que a necessidade de fabricação do produto mais complexo, faz com que as células restritivas do processo operem em sua capacidade máxima por um período entre sete a oito horas de simulação, sendo que este estouro de capacidade, contribui também para a não produção demandada, logo, a existência de perdas produtivas para o processo.

Por outro lado, quando o incremento e a restrição não estão presentes em uma mesma célula, percebe-se que o sistema também não consegue produzir toda a demanda programada, implicando assim em uma perda média produtiva em torno de 59%. Como se pode notar, a perda produtiva para este caso é menor quando comparado com o caso anterior onde a complexidade afeta a célula restritiva do processo. Dentre os resultados apresentados, tem-se agora que a linha modelada deixou de produzir apenas 47,8% de sua produção total, e não mais 52,1%, contribuindo assim para melhores resultados de produtividade.

Em uma análise comparativa com os primeiros resultados obtidos no primeiro grupo de simulação, pode-se notar que a presença do gargalo em pelo menos uma das células da linha de produção modelada, proporcionou uma redução de 14,5% na produtividade de todo o sistema. Com esta redução, a produtividade do sistema passa a ser em média de 1,63 produtos/hora, logo, o sistema é capaz de produzir em média apenas cerca de 40% da demanda solicitada, deixando assim de entregar ao mercado, mais da metade de toda a produção planejada.

No entanto, quando se analisa os efeitos decorrentes da presença de restrições no sistema, e os incrementos na complexidade alterando apenas os processos das células que não são gargalo, tem-se que a redução da produtividade no sistema cai em média 10%, quando comparado com as simulações do primeiro grupo. Com isto, pode-se notar que tanto as restrições de capacidade, como os incrementos na complexidade são capazes de gerar impactos na produtividade do

sistema, entretanto, estes impactos são fortemente mais sentidos pelo aumento da complexidade dos produtos.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como se pode perceber, e para o modelo proposto, a complexidade do produto afeta de modo direto a produtividade do sistema, em uma relação inversa, ou seja, quanto maior for o incremento de complexidade menor será a capacidade de produção do sistema. Percebe-se também que a presença de restrições de capacidade, ou seja, células gargalo no processo, contribui para a redução da produtividade, principalmente quando os incrementos da complexidade são sentidos principalmente nestas células.

Logo, a equipe de desenvolvimento de novos produtos, quando planeja ou projeta um produto mais complexo, deve analisar, além dos elementos que proporcionam uma maior complexidade no produto, os pontos dentro do processo produtivo que estes novos incrementos causam alterações que agravem a capacidade de produção do sistema.

Com isto, além da equipe de desenvolvimento de produtos estar focado no atendimento das necessidades dos consumidores, estará também analisando a melhor forma que este novo produto pode ser processado, sem que a nova complexidade do mesmo seja capaz de gerar maiores perdas no processo. Esta afirmativa converge então com as afirmações já apresentadas por diversos autores (MIRAGLIOTTA; PERONA, 2004; SCHELEICH *et al.*, 2007; BRADOUS, 2011; RAMDAS, 2003), ao salientarem que a complexidade deve se tornar o núcleo de capacidade superior e diferenciador das empresas frente a concorrência, controlando assim o nível crescente de complexidade dos produtos e distribuindo-o de modo eficaz dentro do ambiente fabril.

Deste modo, o incremento na complexidade dos produtos poderá gerar no processo, ou linha de produção, a criação de novas operações para que o produto seja produzido integralmente, afetando assim seus tempos padrões de execução das operações. E este incremento de novas operações pode implicar assim em uma série de efeitos dentro do sistema, como a exigência de horas extras para a conclusão da demanda dentro do tempo máximo, permita que a produtividade do sistema não sofra quedas. Entretanto, o incremento de complexidade pode afetar de tal modo o processo, que a produtividade do mesmo, com base no *lead time* necessário para produção da demanda, seja garantida apenas com a criação de um novo turno de

trabalho, e portanto, mais necessidade de mão de obra, equipamentos e matéria prima.

Em se tratando das simulações realizadas, cabe salientar que considerou-se no sistema de produção a presença de mais de uma célula gargalo, as quais apresentaram resultados similares aos já obtidos. Isto decorre do fato do sistema de produção já estará operando em seu limite de produção, logo, a presença de um gargalo já é o suficiente para a redução da produtividade do mesmo.

Outro ponto abordado nas diversas simulações, foi o emprego de restrições de capacidade acima de 10%, sendo que, os resultados obtidos são diretamente proporcionais a esta restrição de capacidade. Logo, os efeitos decorrentes dos incrementos na complexidade do produto serão os mesmos no processo, sendo que, a perda produtiva será proporcional apenas pela nova restrição imposta ao sistema.

6. CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou contribuir para o estudo e análise da complexidade de produtos e seus efeitos nos sistemas de produção, através do desenvolvimento de um modelo de simulação para verificar os efeitos causados pela complexidade de produtos na manufatura. Em se tratando do estudo da complexidade, e com base em todo o levantamento bibliográfico realizado, conclui-se que seu conceito e definição são abstratos e generalistas, decorrentes das diversas visões que cada pesquisador busca imprimir a ela.

Para alcançar o objetivo geral do trabalho, o cumprimento do primeiro objetivo específico, ou seja, a identificação dos elementos que influenciam e caracterizam a complexidade de produtos foi iniciado na Seção 2.4. Para o alcance deste objetivo, uma ampla pesquisa bibliográfica foi desenvolvida, buscando obter nos mais diversos cenários de pesquisa e campos de atuação, os principais elementos que os autores empregavam para conceituar e analisar a complexidade de seu objeto de estudo. Com isto, pode-se perceber a existência de uma congruência de ideias entre os autores, permitindo a conclusão de que a complexidade de produtos não possui um conceito único e aceito universalmente na literatura, já que sua definição e escopo são definidos com base no objetivo específico de cada pesquisador. Entretanto, mesmo diante dos diversos conceitos apresentados, nota-se que a complexidade de produtos usualmente é caracterizada e estudada sob o olhar de quatro elementos principais que formam a estrutura dos novos produtos e já apresentados no decorrer do trabalho.

Em se tratando do alcance do segundo e terceiro objetivos específicos do trabalho, sendo que o segundo consistiu na identificação das variáveis do sistema produtivo que podem sofrer algum tipo de impacto ou efeito decorrente dos elementos da complexidade de produtos. Enquanto que o terceiro foi focado na determinação das relações de causa e efeito entre os elementos da complexidade de produtos e as variáveis do sistema de produção a ser modelado. Salienta-se que após o alcance do primeiro objetivo específico, de onde pode-se delinear os elementos que compõem a complexidade para esta pesquisa, buscou-se então levantar e conhecer mais profundamente, o cenário e as principais variáveis que compõem um sistema de produção, sendo que este processo se deu em grande parte, através de uma ampla pesquisa bibliográfica e foi consolidado através da construção de

diversos mapas conceituais que buscassem representar e deixar registrado o conhecimento das possíveis relações existentes no ambiente fabril. Deste modo, de posse dos elementos que compõem a complexidade e das principais variáveis de um sistema de produção, realizou-se então um cruzamento detalhado entre os elementos da complexidade e as variáveis da manufatura, buscando assim detectar as relações possíveis entre eles, e ao final de toda esta análise, quais seriam os efeitos que possíveis variações nos elementos delineados para a complexidade poderiam gerar nas principais variáveis do sistema em modelagem, sendo que os principais efeitos foram apresentados e discutidos dentro da Seção 2.5.

Para o alcance do quarto objetivo específico, ou seja, o desenvolvimento de modelos conceituais para representação das relações entre os elementos da complexidade e as variáveis do sistema de produção, adotou-se inicialmente como base de desenvolvimento, todos os mapas conceituais desenvolvidos para representação do sistema de produção e suas relações. De posse destes mapas, buscou-se então construir diversos diagramas causais que se auto interligam, demonstrando assim as possíveis relações que podem vir a existir entre a complexidade de produtos e as variáveis do sistema de produção. Deste modo, as Seções 3.1 e 3.2 foram desenvolvidas, sendo que nelas são apresentados os diagramas causais desenvolvidos juntamente com um conjunto de explicações e diretrizes que buscam demonstrar o conhecimento e interpretação obtido ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, buscou-se então o alcance do quinto e último objetivo específico deste trabalho, que foi o desenvolvimento de um modelo de simulação dinâmico para verificação dos efeitos da complexidade de produtos em um sistema Flow Shop. Para tanto, todos os diagramas causais desenvolvidos foram empregados, sendo que, algumas das variáveis presentes nestes diagramas passaram por algumas alterações que pudessem permitir o desenvolvimento de toda a modelagem matemática utilizada de base para construção do modelo dinâmico. Para criação deste modelo dinâmico, o software Vensim PLE e todo seu ferramental computacional foi utilizado, permitindo assim que as relações apresentadas nos diagramas causais fossem convertidas em modelos genéricos de fluxos e estoques. Com a conclusão deste modelo, um conjunto exaustivo de simulações foi desenvolvido, buscando sempre compreender e verificar os efeitos que os incrementos na complexidade do produto pudessem gerar no sistema de produção em modelagem.

Estes efeitos identificados contribuem para a resposta da pergunta de pesquisa deste trabalho, relacionada com a identificação dos efeitos que a complexidade de produtos pode causar na produtividade dos sistemas produtivos. Além disto, o trabalho demonstrou também que as perdas de produtividade do sistema não são geradas unicamente pelo aumento na complexidade de produtos, mas também, pela má gestão da distribuição desta complexidade dentro do processo produtivo.

Ao passo que pode ser observado, e tendo como base apenas o sistema de produção modelado nesta pesquisa, bem como as simulações realizadas com o mesmo, que o conhecimento prévio do processo produtivo e dos pontos onde possam haver possíveis limitações de capacidade pode ser visto como uma ferramenta essencial para a obtenção de melhores resultados na linha modelada. Dado que, incrementos na complexidade dos produtos que provoquem alterações significativas em pontos do processo que apresentem algum tipo de restrição produtiva, por exemplo, podem provocar maiores perdas produtivas em todo o processo. Logo, para fins desta pesquisa e do sistema modelado, pode-se concluir que os incrementos aditivos na complexidade de produtos podem gerar menores quedas na produtividade da manufatura, se gerenciados e analisados de modo estratégico, ou seja, levando-se em consideração também as características que são inerentes do processo produtivo.

6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

No que diz respeito à possibilidade de trabalhos futuros e com base nas limitações apresentadas por esta pesquisa, propõe-se a consideração, dentro do modelo proposto, de fatores externos à organização, como a análise de mercado e as possíveis causas que possam gerar oscilações na demanda dos produtos simulados;

O desenvolvimento de modelos de simulação que permitam a estruturação e análise dos efeitos causados nos tempos de processamento dos produtos, decorrentes de possíveis alterações pontuais em cada um dos elementos que caracterizam a complexidade de produtos;

Identificar outras variáveis que possam contribuir para o aumento da complexidade, além das empregadas neste trabalho e que resultam no aumento do tempo de fabricação, para avaliar a produtividade dos sistemas sobre outros aspectos, como o número de funcionários, quantidade de horas extras, dentre outras;

O desenvolvimento de um modelo ou incremento de variáveis no modelo proposto, que permitam a análise e verificação dos efeitos que as decisões provenientes do setor de vendas, que podem afetar a demanda dos produtos, juntamente com os incrementos da complexidade de produtos podem gerar na produtividade da produção;

A criação de um modelo de simulação que permita a análise da influência da liderança das empresas é capaz de gerar nos níveis de incrementos da complexidade dos produtos, tendo como base o conhecimento de mercado.

REFERÊNCIAS

ALBERTON, V. **Distribuição de ganhos da produtividade do trabalho no complexo metal-mecânico brasileiro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

ARIENTE, R. N. **Modelo para avaliar o comportamento dinâmico da agregação de valor de serviços no contexto de PSS**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

AXELROD, R. M.; COHEN, M. D. **Harnessing complexity: organization implications of a scientific frontier**. New York: The Free Press, 2000.

BATISTA, J. F. **Simulação dinâmica de modelos operacionais com enfoque aplicado à engenharia de projetos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

BLECKER, T.; ABDELKAFI, N.; KALUZA, B.; KREUTLER, G. Mass Customization vs. Complexity: A Gordian Knot. In: **2nd International Conference An Enterprise Odyssey: Building Competitive Advantage**. Zagreb, Croácia, Junho de 2004.

BLISS, C. **Management von Komplexität**. Wiesbaden, Gabler Verlag, 2000.

BOZARTH, C. C.; DONALD, P. W.; FLYNN C. C.; FLYNN, E. J. **The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance**. *Journal of Operations Management*, v. 27, p. 78-93, 2009.

BRADOUS, S. N. S. 2011. **Complexity of products and their assembly systems**. Tese (Doutorado em Filosofia). Universidade de Windsor. Ontario, Canada, 2011.

CARVALHO, P. G. M. **A indústria brasileira pós-abertura – uma especialização regressiva?**. *Economia Aplicada*, vol. 6, n. 3, 2002.

CLOSS, D. J.; JACOB, M. A.; SWINK, M.; WEBB, G. S. **Toward a theory of competencies for the management of product complexity: six case studies.** *Journal of Operations Management*, vol. 26, p. 590-610, 2008.

COELHO, C. C. S. R. 2001. **Complexidade e Sustentabilidade nas Organizações.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

COLLIER, D. A. 1981. The measurement and operating benefits of component part commonality. *Decision Sciences*, n. 12, vol. 1.

DALGLEISH, G.; JARED, G. E. M.; SWIFT, K. G. **Design for Assembly: Influencing the Design Process.** *Journal of Engineering Design*, p. 17-29, 2000.

DANILOVIC, M.; BROWNING, T. T. **Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices.** *International Journal of Project Management*, 25, p. 300-314, 2007.

DING, F.-Y.; SUN, H. KALLAUS, J. **Analysing Product Complexity Related to Product Variety in a Manufacturing Firm with a Case Study at an Automobile Assembly Plant.** *International Journal of Logistics Management*, n. 3, vol. 3, p. 356-376, 2007.

ELMARAGHY, H. A.; SAMY, S. N. **Complexity mapping of the product and assembly system.** *Assembly Automation*, n. 2, vol. 32, p. 135-151, 2012.

ELMARAGHY, H.; KUZGUNKAVA, O.; URBANIC, R. J. **Comparison of Manufacturing System Configurations – A Complexity Approach.** *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, p. 445-450, 2005.

ELMARAGHY, W.; ELMARAGHY, H.; TOMIYAMA, T.; MONOSTORI, L. **Complexity in engineering design and manufacturing.** *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 61, p. 793-814, 2012.

ELMARAGHY, W.; URBANIC, R. J. **Assessment of manufacturing operational complexity**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53, p. 401-406, 2004.

ESKILANDER, S. 2001. **Design for automatic assembly – a method for product design: DFA2**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Instituto Royal de Tecnologia. Estocolmo, Suécia, 2001.

FERREIRA, A. L. **Rota de Navegação: Desafio Sebrae**. Rio de Janeiro, Expert books, 2003.

FERREIRA, S. M. 2011. **Aumento da Produtividade: utilizando a metodologia Six sigma e lógica Fuzzy, um estudo de caso em uma empresa do Pólo industrial de Manaus – PIM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

FLORENTÍN, C. M. C. 2001. **Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

FUTAMI, A. H. 2012. **Proposta de modelo para avaliação de aprendizagem a partir das operações cognitivas do projetista**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

GARCÍA, J. M. **Curso de Especialización en Dinámica de Sistemas**. Universidade Politècnica de Catalunya, 2001.

GELAIN, D. C. 2010. **Análise da comunalidade no desenvolvimento de produtos e seus impactos no planejamento e controle da produção**. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2010.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5º ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GIOVANNINI, F. 2002. **As organizações e a complexidade: um estudo de sistemas de gestão da qualidade**. Dissertação (Mestrado em Administração). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

GONÇALVES, J. C. S. I. 2009. **Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando**

- o software Vensim PLE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2009.
- GOTTFREDSON, M.; ASPINALL, K. **Innovation versus complexity: what is too much of a good thing?**. *Harvard Business Review*, v. 83, n. 11, p. 1-11, 2005.
- GUPTA, S.; KRISHNAN, V. **Integrated component and supplier selection for a product family.** *Production and Operations Management*, vol. 8, n. 2, p. 163-183, 1999.
- HOBDAY, M. **Product complexity: Innovation and industrial organization.** *Research Policy*, vol. 26, p. 689-710, 1998.
- HOOLE, R. Drive complexity out of your supply chain. *Harvard Business School Newsletter*, vol 3, Janeiro, 2006.
- IAROSZINSKI, A. N. 2001. **Proposta de um modelo conceitual de gestão da produção baseado na teoria da complexidade: O modelo IMPLEXE.** Monografia (Professor Titular). Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2001.
- IWAYA, L. H. 2009. **Desenvolvimento de uma aplicação de apoio ao projeto para montagem.** Monografia (Graduação em Ciência da Computação). Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2009.
- JACOBS, M. A.; SWINK, M. **Product portfolio architectural complexity and operational performance: incorporating the roles of learning and fixed assets.** *Journal of Operations Management*, vol. 29, p. 677-691, 2011.
- JACOBS, M. **Product Complexity: A definition and Impacts on Operations.** *Decision Line*, Outubro, 2007.
- KASKI, T.; HEIKKILA, J. **Measuring product structures to improve demand supply chain efficiency.** *International Journal of Technology Management*, vol. 23, n. 6, p. 578-598, 2002.
- KINNUNEN, M, J. 2006. **Complexity measures for system architecture models.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Gestão). Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Massachusetts, 2006.
- KOTTEAKU, A. G.; LAIOS, L. G.; MOSCHURIS, S. I. **The influence of product complexity in the purchasing structure.** *Omega - International Journal of Management Science*, vol. 23, n. 1, p. 27-39, 1995.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 5º ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- LEE, T. S. 2003. **Complexity theory in axiomatic design.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Massachusetts, 2003.

- LEITE, M. S. A.; BORNIA, A. C.; COELHO, C. C. R. S. **Os conceitos de dialógica e sistema adaptativo complexo (SAC) aplicado à cadeia de suprimentos: uma contribuição da ciência da complexidade.** *Revista Pesquisa e Desenvolvimento: Engenharia de Produção*, n. 3, p. 27-42, 2004.
- LEITE, M. S. A.; BORNIA, A. C.; COELHO, C. C. S. R. A Dinâmica das interações e a Gestão dos Custos. In: **Seminário Custos para a toma de decisiones.** Ciudad De Leste, Paraguai, Agosto, 2013.
- LIKER, J. L. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo.** Porto Alegre: Bookman, 2005.
- MACDUFFIE, J. P.; SETHURAMAN, K.; FISHER, M. L. **Product variety and manufacturing performance: evidence from the international automotive assembly plan study.** *Management Science*, vol. 42, n. 3, p. 350-369, 1996.
- MARIOTTI, H. **Pensamento complexo: suas práticas à liderança, à aprendizagem e ao desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Atlas, 2007.
- MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção.** São Paulo: Saraiva, 2º Ed, 2005.
- MENEZES, E. M.; SILVA, E. L. **Metodologia de Pesquisa e Dissertação.** 4º ed. Florianópolis: 2005.
- MEREDITH, J. R.; SHAFER, S. M. **Administração a Produção para MBA's.** Porto Alegre: Bookman, 2002.
- MINAYO, M. C. S.; HARTZ, Z. M. A.; BUSS, P. M. **Qualidade de vida e saúde: um debate necessário.** *Ciência e Saúde Coletiva*, vol. 5, n. 1, 2000.
- MIRAGLIOTTA, G.; PERONA, M. **Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework.** *International Journal of production Economics*, v. 90, p. 103-115, 2004.
- MORIN, E. **Ciência com consciência.** 14º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.
- MORIN, E. **O método IV: Ética.** Mem Martins: Publicações Europa América, Portugal: 2005.
- NITO, L. C. 2003. **Aplicação do trabalho padronizado com foco na produtividade: um estudo de caso em uma empresa do setor automotivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.
- OTTOSSON, S. **Dynamic product development – DPD.** *Technovation*, vol. 24, p. 207-217, 2004.

- PASCHE, M. **Product Complexity Reduction: Not Only a Strategy Issue**. In: **11th Quality Management and Organizational Development Conference**. Helsingborg, Sweden, Agosto, 2008.
- RAMDAS, K. **Managing product variety: An integrative review and research directions**. *Production and Operations Management*, n. 12, vol. 1, 2003.
- RODRÍGUEZ-TORO, C. A.; TATE, S. J.; JARED, G. E. M.; SWIFT, K. G. **Complexity metrics for design (simplicity + simplicity = complexity)**. *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, p. 721-725, 2003.
- SANTOS, A. M. D. 2006. **A aplicação de um modelo de simulação para o gerenciamento de projetos: um estudo de caso utilizando a dinâmica de sistemas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- SCHLEICH, H.; SCHAFFER, J. Managing complexity in automotive production. In: **ICPR - XIX International Conference on Production Research**, Valparaíso, Chile, 2007.
- SCHULZ, A. A. 2008. **Relações complexas na administração da produção**. Dissertação (Mestrado em Administração). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.
- SHIBATA, H.; CHELDELIN, B.; ISHII, K. Assembly quality methodology: A new method for evaluating assembly complexity in globally distributed manufacturing. In: **ASME International Mechanical Engineering Congress**, American Society of Mechanical Engineers, Washington, Estados Unidos, p. 335-344, 2003.
- SILVA, C. A. L. 2010. **Avaliação da implantação de um sistema de medição da produtividade no ambiente de engenharia de manutenção em usinas hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
- STERMAN, J. D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. McGraw-Hill, 2000. 982 p.
- SUH, N. P. **A theory of Complexity and applications**. Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, Estados Unidos, 2003.
- SUH, N. P. **Complexity in engineering**. Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Cambridge, Estados Unidos, 2005.
- TARRIDE, M. I. **Saúde Pública: uma complexidade anunciada**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 1998.
- TONI, A.; TONCHIA, S. **Manufacturing flexibility: a literature review**. *International Journal of Production Research*, vol.36, p. 1587-617, 1998.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Minas Gerais: UNIFEI, 2012.

WACKER, J. G. **A theory of formal conceptual definitions: developing theory-building measurement instruments**. *Journal of Operations Management*, n. 22, vol. 6, 2004.

WANG, H. 2010. **Product variety induced complexity and its impacto n mixed-model assembly systems and supply chains**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica Industrial e Engenharia de Operações). Universidade de Michigan. Michigan, 2010.

WANG, H.; ZHU, X.; WANG, H.; HU, S. J.; LIN, Z.; CHEN, G. **Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly systems**. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 30, p. 16-27, 2011.

WU, Y.; FRIZELLE, G.; EFSTATHIOU, J. **A study on the cost of operational complexity in customer-supplier systems**. *International Journal Production Economics*, vol. 106, p.217-229, 2007.

ZHU, X., HU, S. J., KOREN, Y.; MARIN, S. P. **Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines**. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 130, 2008.